基于二维材料亚阈值晶体管的超低功耗神经形态障碍物检测

Kartikey Thakar[1], Bipin Rajendran[2], 和 Saurabh Lodha[1,*1]印度理工学院孟买分校电气工程系，印度孟买。[2]伦敦国王学院工程系，英国伦敦斯特兰德。
*slodha@ee.iitb.ac.in

关键词
二维材料；神经形态；LGMD；碰撞规避；障碍物检测

摘要
对运动障碍物进行准确、及时且有选择性的检测，对自主机器人可靠地实现碰撞规避至关重要。基于互补金属氧化物半导体的脉冲神经元用于障碍物检测时存在面积和能效方面的不足，而新兴的基于二维（2D）材料的器件具备可重构、可调谐和低功耗运行能力，可解决这一问题。我们提出了一种超低功耗脉冲神经元，它采用静电调谐双栅晶体管构建，具有超薄且通用的二维材料沟道。二维亚阈值晶体管（2D-ST）经过精心设计，可在低电流亚阈值区工作。在广泛的栅极和漏极偏压范围内，载流子输运通过越垒热发射电流和 Fowler–Nordheim 接触势垒隧穿电流进行建模。使用二维亚阈值晶体管和 45 纳米 CMOS 技术元件设计的神经元电路仿真表明，其能效很高，达到 ~3.5 pJ/尖峰，并呈现生物拟态的 I 类脉冲以及振荡脉冲。该电路还展现了脉冲频率适应和抑制后反弹等复杂神经元行为，这些行为对动态视觉系统至关重要。叶 lobula 巨大运动检测器（LGMD）是蝗虫体内的一种碰撞检测生物神经元。我们的神经元电路能够产生类似 LGMD 的脉冲行为，并以 <100 pJ 的能耗检测障碍物。此外，该电路还可重新配置，以高选择性区分逼近和远离的物体。

引言脑启发神经

神经形态计算范式通过模仿人脑中事件触发式学习和推理的特点，有望彻底革新嵌入式节能决策系统。基于这一范式的硬件实现还可借助新型纳米器件支持的存内计算，缓解吞吐量瓶颈[1-4]。近年来，电子硬件和软件算法同步进步，并着重推动低功耗、低面积和高时间效率的计算应用，为神经形态工程的发展注入了动力。脉冲神经网络（SNN）的架构从大脑获得启发，由独立的脉冲神经元（最小的“计算”元件）构成，各神经元通过突触（神经元之间的功能性连接）相互连接。研究表明，SNN 能够以最少的资源灵活、稳健地执行复杂计算[5,6]。

自主机器人和车辆在制造业和交通运输领域日益发展，并得到广泛应用。在未知地形中自主移动，需要高效的目标跟踪能力和及时的障碍物检测能力。对逼近和远离的物体进行障碍物检测并选择性地作出响应，对实时路径规划非常有用。基于超大规模集成电路视觉系统的现有解决方案采用复杂算法，虽能提供性能，却以面积和能量效率低下为代价[7-10]。许多生物物种的视觉通路中都有碰撞检测神经元，能够根据进入其视野的物体轨迹区分并检测威胁[11-15]。例如，蝗虫的视觉神经通路中有专门的逼近敏感神经元，称为叶状体巨型运动探测器（LGMD），能够在几毫秒内检测到与逼近物体发生碰撞的可能性。LGMD神经元根据物体的大小和速度，通过其放电率编码进入视野物体的动态特征[12,16,17]。蝗虫神经生物学中一个引人入胜的细节是，它们只有两个这样的神经元（每只眼睛一个），却能帮助它们精准而高效地避免碰撞。LGMD的另一项重要特性是，它会选择性地响应逼近造成的碰撞威胁，而远离的物体则不会引发明显的尖峰响应。从安全角度来看，这种选择性至关重要，尤其是在逼近的物体正处于直接碰撞路径上时。因此，LGMD是一个绝佳范例，展示了脉冲神经元如何以最少的资源，高效实现复杂认知任务所涉及的计算动态。

在本研究中，我们展示了一种低功耗神经元，它采用基于二维材料的亚阈值晶体管，能够高度复现 LGMD 神经元的核心计算特征。二维材料是新型器件架构的理想候选材料，可实现可调且低功耗、兼容CMOS的运行[18-25]。我们设计了一种双栅二维晶体管，在亚阈值工作下能够产生低电流钟形电流-电压（I-V）转移曲线，并可通过两个栅极偏置信号的静电控制进行调节。钟形 I-V 曲线有助于模拟 Hodgkin-Huxley（HH）模型[26,27]所描述的生物神经元中钠通道的快速激活和自失活。通过对钟形 I-V 曲线进行基于物理的建模，我们证明二维亚阈值晶体管（2D-ST）中的输运由两种不同的物理现象支配：越势垒热发射电流和 Fowler-Nordheim（FN）隧穿电流。该器件的设计与运行经过优化，相较于现有文献中的方案具有双重优势：（i）采用低电流运行，实现高能效；（ii）使用单材料沟道即可简化制造流程、降低复杂度，同时不牺牲静电控制的调节能力。

接下来，我们将二维材料亚阈值晶体管器件的行为模型与45纳米互补金属氧化物半导体相结合，设计出一种低功耗电路，以展示仿生I类规则放电行为，并实现低功耗（~3.5 皮焦/尖峰）运行。仿真表明，通过

调节漏电通路的电导，该电路可以适配为振荡神经元，也可以修改为表现出尖峰频率适应（SFA）和抑制后反弹（PIR）尖峰。SFA和PIR都是生物LGMD神经元所展现的重要功能[28,29]。最后，我们通过对逼近（接近）物体和远离物体的突触电流进行建模，证明基于二维材料亚阈值晶体管器件的神经元电路能够在不同测试条件下模拟LGMD神经元的行为特征。我们表明，该电路始终能够在碰撞前检测到逼近物体，仅需少量尖峰（<30），能量耗散为<100 皮焦。此外，人工神经元电路还能够有效复现LGMD区分逼近物体和远离物体的功能。这种对接近物体的固有选择性有助于优先响应直接路径上的障碍物碰撞。更进一步，我们还展示了如何轻松重新配置LGMD电路，使其产生对逼近物体或远离物体具有选择性的尖峰响应。这种灵活性为实时多目标跟踪系统的设计增加了自由度，使系统能够针对视野中运动物体的速度和方向产生不同响应。

本研究展示了一种具有仿生 LGMD 功能的脉冲神经元电路，其尖峰功耗低，可用于能效高的障碍物检测应用。这使此类电路能够无缝集成到常开、低功耗的基于脉冲神经网络的系统中，这些系统采用事件驱动信号处理和计算算法运行。此外，与采用新型材料系统的仿生脉冲神经元（$\times 10^5$）和 LGMD 应用（$\times 10^2$）相关的现有文献相比，二维亚阈值晶体管神经元还能将功耗降低数个数量级[30-32]。采用尺寸缩小的晶体管技术，还可进一步提升能效[33,34]。

结果与讨论

二维亚阈值晶体管二维晶体管的设计

的设计旨在实现低电流、钟形的电流-电压转移曲线（I_D-V_G），以模拟生物钠通道中依赖电压的电导，从而以低能量耗散实现符合生物特性的尖峰频率。该钟形曲线具有负跨导区域和正跨导区域，可用于实现尖峰起始所需的正反馈以及尖峰复位所需的自失活。本器件通过同时对（i）二维沟道势垒进行静电控制以调节器件电导，以及（ii）对肖特基势垒进行静电控制以调节 FN 隧穿驱动的电流注入，从而实现这一设计要求。本器件采用沟道栅极（G_C）和源极/漏极肖特基势垒栅极（G_B）实现这种双重静电控制。通过采用适当的偏置方案进行亚阈值工作，可获得较低的器件电流。图 1a 展示了二维亚阈值晶体管的制造步骤。器件在 Si/SiO_2 衬底上制造，首先对 G_C 和 G_B 背栅进行图形化。接着，将机械剥离的六方氮化硼转移到图形化栅极上作为底栅介电层，随后通过干法转移二维半导体材料。本研究尝试了三种不同的二维半导体，即 MoS_2, 、WSe_2 和 WS_2，结果表明，无论沟道材料为何，也无论其倾向于呈 n 型还是 p 型，均可获得钟形电流-电压曲线。最后，制作源极/漏极金属电极，并使其与 G_B 重叠，以实现有效的肖特基势垒控制。尽管本研究选用了机械剥离薄片，但同一架构也可用于可扩展制造，即通过大面积生长二维介电材料和半导体材料来实现。

图1b展示了采用MoS_2 沟道制备完成的二维亚阈值晶体管的光学图像。通过原子力显微镜（AFM）测量，确定六方氮化硼和MoS_2 薄片的厚度分别为~35 纳米和~3.5纳米（补充材料（SM）图S1）。图1c绘出了MoS_2 器件在不同栅极偏压（V_{GC}、V_{GB}）下的器件电流。n型MoS_2 在负偏压（$V_{GC} = V_{GB} = -4$ V）下表现出可忽略的关态电流（~5 皮安），并在正偏压（V

电流（~600 纳安）下达到较高的导通态电流。根据V_{GB} = V_{GC} 条件下从图1c提取的电流轨迹呈现出预期的常规n型场效应晶体管特性（右上方的红色曲线）。然而，沿相反方向（$V_{GB} \equiv -V_{GC}$）提取电流轨迹，可获得低电流（~15 纳安）的钟形曲线（左上方的蓝色曲线），从而迫使器件在亚阈值区工作。

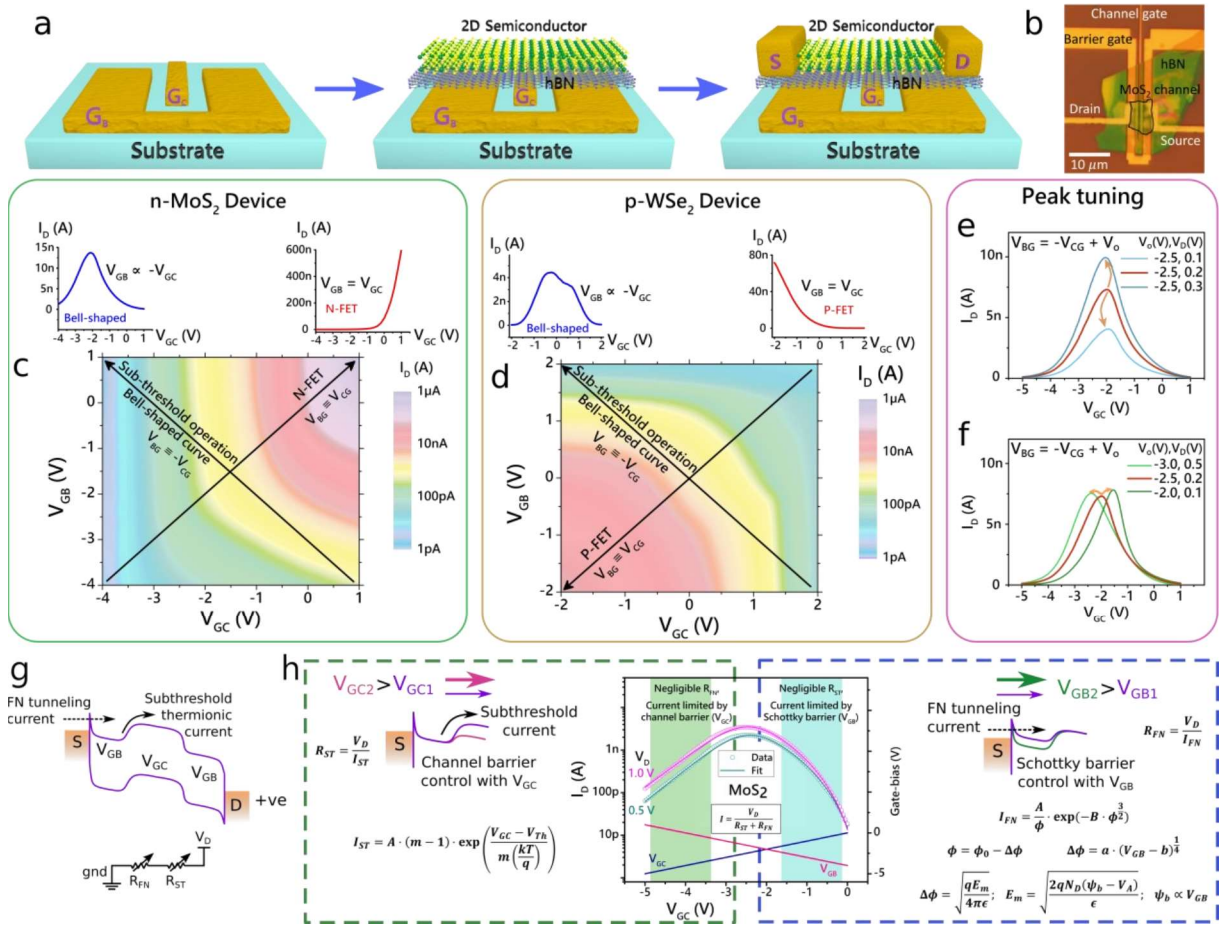


图 1. 二维亚阈值晶体管的设计与工作原理。(a) 示意图展示了具有多栅场效应晶体管结构、六方氮化硼栅介质和 n 型或 p 型二维半导体沟道的二维亚阈值晶体管（2D-ST）的典型制备流程。两个栅极——沟道栅极（G_C）和势垒栅（G_B）——控制二维沟道势垒以及源极/漏极接触处的肖特基势垒。(b) 制备完成的二维亚阈值晶体管（2D-ST）的光学图像，其沟道为少层 n 型 MoS_2。(c) 伪彩色图展示了器件电流随沟道栅极和势垒栅极偏压（V_{GC}、V_{GB}）的变化。如预期所示，该器件呈现 n 型场效应晶体管特性。沿电流图中 $V_{GC} = V_{GB}$ 方向进行线扫描，可得到常规的 n 型场效应晶体管转移曲线；而沿相反方向（$V_{GC} \equiv -V_{GB}$）进行线扫描，则可在亚阈值工作下得到钟形曲线。低电流值对应的亚阈值区是目标工作区。钟形曲线可用于在仿生脉冲神经元电路中模拟钠（Na）通道的行为。(d) 无论二维沟道材料和主要导电极性（n 型或 p 型）如何，这种获得钟形曲线的技术均适用。图中展示了与 (c) 类似的结果：p 型 WSe_2 沟道在 $V_{GC} = -V_{GB}$下呈现钟形曲线。此外，通过 G_C 和 G_B进行静电控制，可调节钟形曲线。采用 n 型 MoS_2 器件，通过适当的偏压绘制峰值电流 (e) 数值和 (f) 位置的调节情况。(g) 器件中的电流由 Fowler-Nordheim隧穿电流（V_{GB}）和越势垒热发射电流（V_{GC}）控制。这两个电流分量可用串联的两个可变电阻（R_{FN} 和 R_{ST}）建模。(h) 可通过解析方程对钟形电流-电压曲线进行分区拟合，估算 R_{FN} （蓝色）和 R_{ST} （绿色）。中间的图展示了结合两个电阻的作用对完整电流-电压曲线进行拟合的结果。

所提出的偏置方案适用于各种沟道材料及其电荷极性（n 型或 p 型）。图1d展示了采用 p 型 WSe_2 沟道时与图1c类似的结果。沿 $V_{GB} = V_{GC}$ 方向的电流轨迹呈现常规的 p型场效应晶体管响应（红色曲线），而沿 $V_{GB} = -V_{GC}$ 方向的电流轨迹则呈现钟形曲线（蓝色曲线），电流值较低（~4 nA）。采用 n型 WS_2 也获得了类似结果（补充材料图S2）。此外，得益于静电栅控所提供的自由度，可通过设置适当的偏置电压 V_o（$V_{GB} = -V_{GC} + V_o$）和 V_D （图1e、f），进一步调节这些钟形电流峰的峰值或位置。这种可调性可用于器件运行，在仿生神经元设计中实现可调的 Na 通道电流。

图1g中的能带图说明，两个栅极电压 V_{GC} 和 V_{GB} 分别控制源极势垒处的热发射电流和接触处的 FN隧穿。图中还展示了一个等效模型，其中可变电阻 R_{ST} 和 R_{FN} 分别对应这两种输运机制，器件的总电阻为 $R = R_{ST} + R_{FN}$。在亚阈值区，当载流子注入不受限制（V_{GB}较大）时，钟形曲线左侧的器件电流受源极-沟道势垒限制（由 V_{GC}控制）。如图1h所示的电流-电压曲线（MoS_2 器件）表明，随着曲线向右移动，器件运行逐渐转变为受载流子注入限制（V_{GB}为负），此时不存在源极-沟道势垒（V_{GC}较大）。我们采用基于物理的分区拟合，阐明了左侧（绿色）由越势垒输运（V_{GC}）限制、右侧（蓝色）由 FN隧穿（V_{GB}）限制的输运区间。用于描述各输运区间的方程组，以及示意性的局部能带图，分别显示在图1h电流-电压曲线的两侧。通过利用器件架构，同时控制这两种输运机制来调控器件运行，我们可以实现低电流钟形电流-电压曲线。补充材料第S3节详细讨论了钟形电流-电压曲线的拟合，以及提取参数与器件实际尺寸之间的关联。值得注意的是，在相同模型参数下，我们能够在广泛的工作条件范围内，使模型与实验数据高度吻合且置信度很高，证实双区间模型能够准确解释钟形工作曲线背后的物理机制。我们还注意到，因此，我们器件背后的物理机制不同于先前报道的高斯晶体管[32,35]。

仿生神经元轴丘神经元

包含二维亚阈值晶体管 Verilog-A 模型以及来自 45纳米互补金属氧化物半导体通用工艺设计套件（gpdk）的元件的神经元电路如图2a所示。这里，V_M 表示轴丘处的膜电位，该处汇集来自前神经元的总突触电流（仿真中以电流源 I_{syn} 表示），同时也是后神经元的输出节点。C_M 是该细胞的膜电容。二维亚阈值晶体管 T_{Na} 作为上拉晶体管来模拟钠通道，其电流由两个栅极输入 V_{GC} 和 V_{GB}控制。T_{Na} 的栅极偏压由两对反相器（I1：$MP1_{Na}$-$MN1_{Na}$，以及 I2：$MP2_{Na}$-$MN2_{Na}$）驱动，从而根据膜电位 V_M生成极化钠通道电流（I_{Na}），同时确保 V_{GC} 和 V_{GB} 朝相反方向变化（即 $V_{BG} \sim -V_{GC}$），以产生所需的钟形 I-V 响应。钠激活钾通道电流（I_K）由晶体管 T_K实现，该晶体管由延迟元件（MN_K-C_K）驱动，以模拟一种延迟响应；该响应主要由钠通道激活后电路中流动的较大 I_{Na}激活。晶体管 T_L 处于关断状态，可提供高电阻漏电通路。改变 T_L 的电导，可调节触发尖峰响应所需的阈值输入电流（I_T）。

为了解电路工作原理，考虑所有电容器均已放电且膜处于静息电位（$V_M = V_{rest}$）的初始条件。(1) 来自前神经元的输入突触电流（I_{syn}）开始为 C_M 充电，同时与 V_M相关的漏电流 I_L 流经 T_L。(2) 当 V_M 达到反相器对 I1 的开启阈值后，栅极偏压 V_{GC} 升高，而栅极偏压 V_{GB} 开始

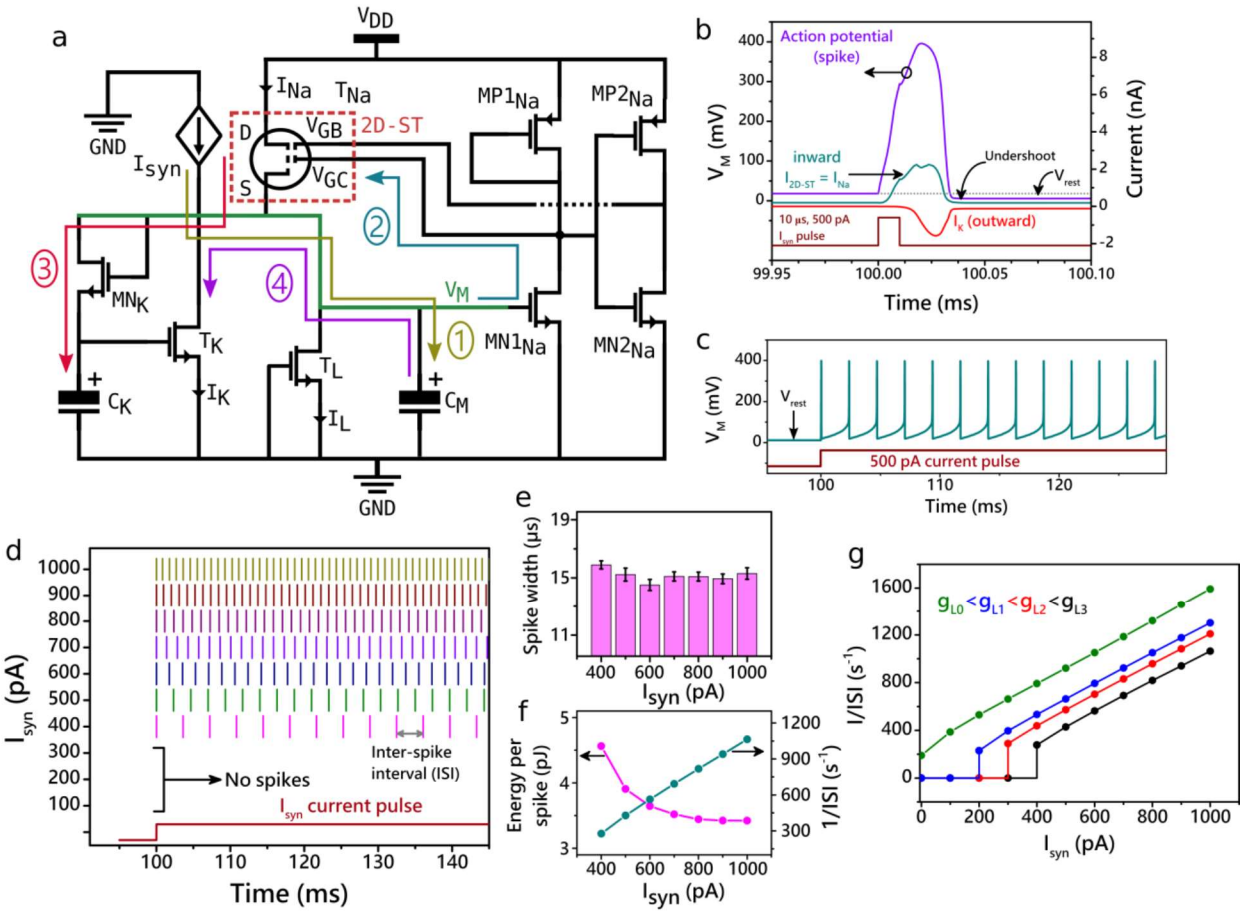


图 2. 采用二维亚阈值晶体管的仿生神经元。(a) 仿真电路示意图，其中二维亚阈值晶体管用于模拟钠（Na）通道电流。两个反相器（$MN1_{Na}$-$MP1_{Na}$ 和 $MN2_{Na}$ - $MP2_{Na}$）用于驱动二维亚阈值晶体管的两个栅极（V_{GC} 和 V_{GB}）。带有延迟元件（MN_K-C_K）的 T_K 提供延迟的钾（K）通道电流。C_M 为膜电容。T_L 代表漏电通路。V_{DD} 为电源，I_{syn} 用于提供输入突触电流。除二维亚阈值晶体管外，所有晶体管（金属氧化物半导体场效应晶体管）和电容器（MOS电容器）均取自 45 nm 工艺设计套件。节点 V_M 用于记录动作电位或尖峰。(b) 仿真结果显示，施加 10 µs、500 pA 的 I_{syn} 脉冲会产生单个尖峰。图中还绘出了钠和钾通道电流以供参考；相对于 V_M的内向电流以正值表示。还观察到相对于静息电位（V_{rest}）的下冲，如图所示。(c) 电路响应显示，在持续输入 500 pA 电流时呈现规则尖峰行为。(d) 栅格图显示尖峰活动随输入电流幅值的变化。低至 300 pA 的电流不会诱发尖峰，表明存在产生尖峰的阈值输入电流（I_T）。电流从 400 pA 增至 1000 pA 时，尖峰持续出现，且尖峰密度单调增加。连续两个尖峰之间的间隔，即尖峰间隔（ISI），用于记录瞬时尖峰率或频率。(e) 在 V_M = 300 mV 处测得的尖峰宽度随 I_{syn} 幅值变化极小。(f) 单次尖峰能量随 I_{syn} 在 4.5-3.5 pJ 之间变化，而尖峰率（或 ISI^{-1}）随 I_{syn}线性增加。(g) 可通过改变 T_L 的电导来调节 I_T；降低电导会使 I_T 减小、尖峰率增加。(b-f) 中所示数据对应于 g_{L3}。对应于 g_{L0} 的情况在 $I_{syn} = 0$ 下显示出非零尖峰，表明该电路也可用作振荡神经元。

在反相器 I2 的作用下减小；这会导致较大的去极化电流 I_{Na} （与 I_{syn}相比）从 T_{Na}流出。(3) 这股过量电流 I_{Na} 开始快速为 C_K 充电，从而激活 T_K产生延迟响应。(4) T_K 一旦激活，就会充当电流汲取端，使 C_M 放电（相当于极化电流），从而迅速拉低 V_M，并在此过程中关闭 I_{Na}。这些步骤完成一个动作电位（尖峰）生成周期。图 2b 绘出了由 10μs/500 皮安 I_{syn} 脉冲产生的单个尖峰，以及 I_{Na} 和 I_K，其中内向电流以正值表示。从对持续 500 皮安 I_{syn} 刺激的响应可以看出，该电路的行为类似于规则放电神经元（图 2c）。补充材料图 S4 讨论了该电路与 Hodgkin–Huxley 模型的等效性。此外，补充材料图 S5 详细探究了该电路作为漏积分发放（LIF）神经元的行为，其中 I_{syn} 脉冲的频率和脉冲宽度可变。

该电路利用二维亚阈值晶体管的钟形电流-电压特性，实现了 I_{Na} 随 V_M 降低（自失活）。这对于减少流经 C_K 的过量电流，并使其通过 T_K放电至 V_M，至关重要。值得注意的是，一旦钠通道电流被激活，电路便会进入自维持循环，不受 I_{syn}影响，完成整个尖峰生成周期。这也是生物神经元中观察到的一种显著特性。此外，T_K 一旦激活，便可将 V_M 驱动至低于 V_{rest}（超极化），使其相对于 V_{rest} 产生下冲，直至由 MN_K-C_K决定的栅极电压回落至接近零（接地）。二维亚阈值晶体管的阈值电压对于设定其工作区域至关重要，该区域需与电路中其余晶体管兼容。由于这些器件的等效氧化层厚度（EOT）为 ~40 纳米，制成的二维材料亚阈值晶体管器件工作在 2 伏范围内；而标称 45纳米互补金属氧化物半导体晶体管的工作范围为 0–1 伏，其 EOT 为 ~2.5 纳米。因此，在电路评估时，为考虑 EOT 和阈值电压的差异，我们采用 p型二硒化钨二维亚阈值晶体管器件的行为特性，并对栅极偏压进行缩放，以 V’ = V/4 + 0.5 表示，将 ±2 V 的范围映射至 45 nm 工艺设计套件的标称 0–1 伏范围。我们还设计并仿真了一个类似电路，以电阻-电容元件替代互补金属氧化物半导体元件，并采用较高的 V_{DD} = 2 V，以适应 p型二硒化钨器件较宽的栅极偏置范围（±2 V），而不进行缩放（SM 图 S6）；该电路展现了仿生漏积分发放神经元行为，单次尖峰能量为 ~500 皮焦。

针对 I_{syn} 从 100 皮安到 1000 皮安的不同幅值，重复进行了电路仿真，结果汇总于图2d。图2d中的每个条形（|）代表一个尖峰。当 I_{syn} = 100为 300 皮安时不会产生尖峰，这表明存在一个 I_T > 300 皮安。I_{syn} ≥为 400 皮安时观察到 I类规则尖峰响应[36]，且尖峰率随 I_{syn} 幅值增大而上升。瞬时尖峰率可用两个连续尖峰之间的时长表示，该时长称为尖峰间隔（ISI）；ISI 越短，尖峰率越高。如图2e所示，在一系列 I_{syn} 值下，于 V_M = 300 毫伏处测得的尖峰宽度变化很小，该测量对应于电路响应。单次尖峰能量（EPS）是指一个完整尖峰期间（或两个连续尖峰之间的时长内）所有电路元件耗散的能量。图2f显示了 EPS 和 ISI^{-1} 随 I_{syn}变化的情况。EPS 最低可达 ~3.5 皮焦，使该电路适用于低功耗脉冲神经元应用。通过改变晶体管 T_L的宽长比，对不同漏电导（g_L）值重复进行了与图2d类似的实验。较小的 g_L 值可产生较小的 I_T，如图2g所示；对于 I_{syn} = 0，也能实现尖峰响应。此类电路可用作振荡神经元，在没有外部突触电流输入的情况下以恒定频率周期性地产生尖峰。这种配置有助于实现丘脑皮层网络[37,38]。图2a中电路各元件的详细信息列于补充材料表S7-1。

尖峰频率适应（SFA）和抑制后反弹（PIR）除了规则放电行为外，生物神经元还表现出丰富多样的行为

的尖峰模式[36]。这些不同的尖峰行为满足神经网络的不同功能需求。尖峰频率适应和

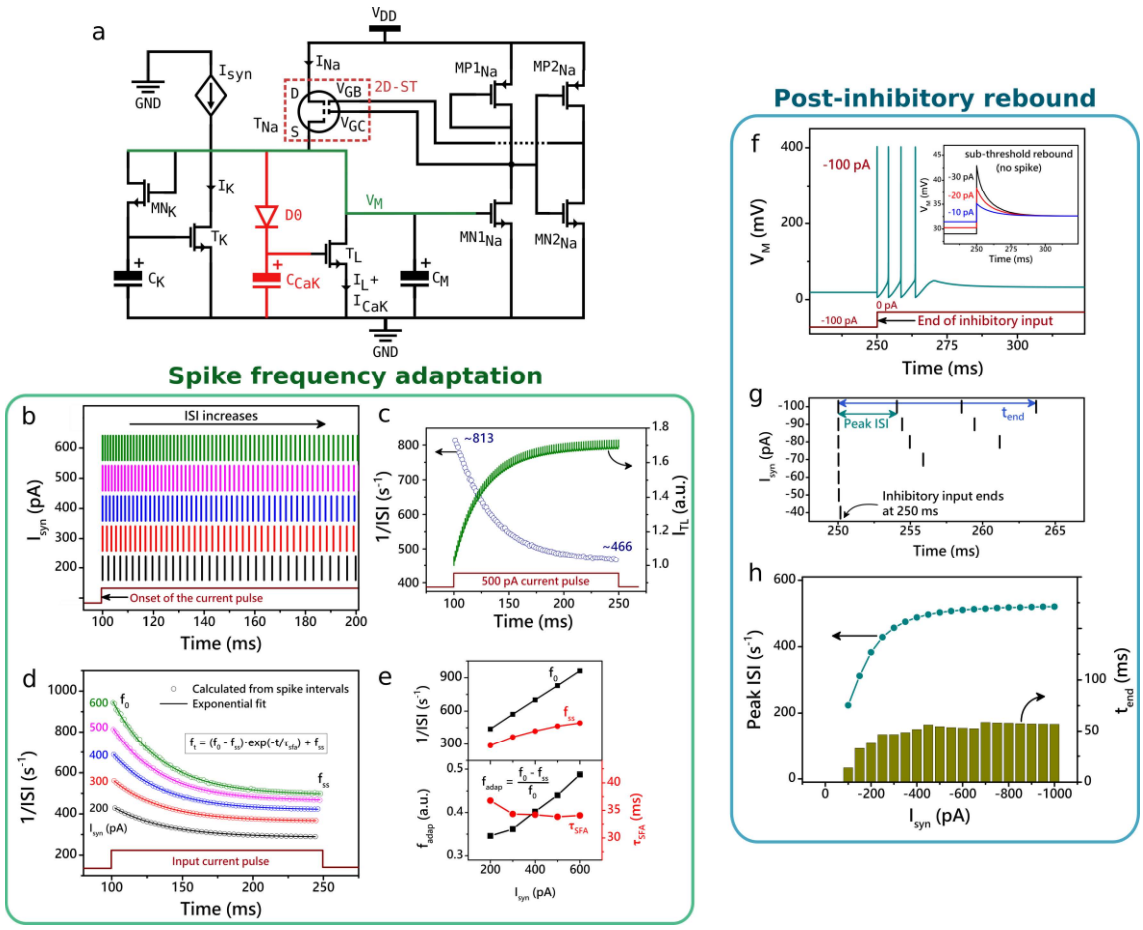


图 3。尖峰频率适应和抑制后反弹。(a) 用于通过模拟钙激活钾通道（K_{Ca}）来展示尖峰频率适应的改进电路示意图。串联在电容器 C_{CaK} 前的二极管 D0（以红色标示）在晶体管 T_L的帮助下，使超极化电流以非线性方式延迟上升。(b) 对 (a) 中的电路进行仿真，施加一系列幅值（200-600 pA）的 I_{syn} 脉冲后得到的尖峰频率适应栅格图。尖峰间隔随时间增加，换言之，尖峰频率降低。(c) 对于 500 pA 的 I_{syn} 脉冲，瞬时尖峰间隔和流经 T_L 的电流（I_{TL}）随时间的变化。I_{TL} 同时模拟漏电流（I_L）和 K_{Ca} 电流（I_{CaK}）。尖峰间隔$^{-1}$ 随着 I_{TL}的增加而降低并饱和至较低值。(d) 瞬时尖峰间隔$^{-1}$ 随时间的变化，与 (b) 类似，数据取自 (a)。采用指数衰减函数拟合数据，以提取初始尖峰频率（f_0）、稳态尖峰频率（f_{ss}）和衰减时间常数（τ_{SFA}）。适应因子（f_{adap}）计算为 $(f_0-f_{ss})/f_0$。(e) 展示从 (d) 中提取的参数随 I_{syn}变化的曲线。如预期，f_0 随 I_{syn} 增加，而 f_{ss} 值降低。τ_{SFA} 不随 I_{syn} 变化，符合预期；f_{adap} 随 I_{syn} 增加，表明由于 I_{CaK}的作用，尖峰率存在上限。(f) 从功能上看，相同的元件（D0-C_{CaK}）也有助于在抑制性（负）电流输入后引发反弹信号。-100 pA I_{syn} 脉冲结束后的 V_M 曲线显示了尖峰生成。插图显示，对于无法生成尖峰的较低 I_{syn} 幅值（10- 30 pA），V_M 中的抑制后反弹逐渐增强。(g) 显示抑制性 I_{syn} 幅值下尖峰时序的栅格图。随着负 I_{syn}增大，尖峰数量和尖峰间隔$^{-1}$ 增加。记录相对于抑制性输入结束时最后一个尖峰出现的时间，并记为 t_{end}。(h) 峰值尖峰间隔$^{-1}$ 和 τ_{end} 随着负 I_{syn}增大而增加并达到饱和。t_{end} 的饱和及其与 τ_{SFA} 的相似性进一步证实了 D0-C_{CaK} 在引发抑制后反弹中的作用。

抑制后反弹是能够在单细胞层面实现复杂神经计算的两种特性之一。研究表明，神经元的尖峰频率适应在涉及认知、推理和记忆的若干任务中发挥重要作用[39-41]。人脑中约有 40% 的新皮层兴奋性神经元表现出尖峰频率适应功能。尖峰频率适应意味着，对于恒定的输入突触电流，神经元的尖峰率会随时间逐渐降低（与规则放电中恒定电流输入对应恒定尖峰率的情况相反）；其时间常数由潜在的生化机制决定。研究表明，若干离子通道会参与脉冲频率适应。Ca^{2+}激活的钾通道（极化电流）是实现尖峰频率适应功能的重要离子通道之一[42,43]。

在图2a所示电路中，仅需增加一个延迟元件（D0-C_{CaK}）来驱动漏电通路 T_L，如图 3a 所示，即可实现尖峰频率适应。这些改动使 T_L 能够同时执行两项任务——(i) 提供恒定漏电通路（相当于 C_{CaK} 完全放电时的情况）；以及 (ii) 提供由 D0-C_{CaK}控制、随时间变化的延迟钾通道电流 I_{CaK}（不同于 Na 激活的钾通道电流 I_K）。因此，流经 T_L 的电流可表示为 $I_{TL} = I_L + I_{CaK}$。图 3a 电路中各元件的详细信息列于补充材料表 S7-2。图3b展示了在一系列 I_{syn}幅值下（对于图 3a 所示电路）尖峰活动的栅格图。在 I_{syn} 不变时，尖峰率随时间降低（或尖峰间隔增大），表明出现了 SFA行为。

为阐明 I_{CaK} 在尖峰频率适应中的作用，图 3c 绘出了 I_{syn} = 500 皮安时瞬时尖峰间隔$^{-1}$ 随时间的变化，并同时显示了 $I_{TL} = I_L + I_{CaK}$。由于 I_L 与 I_{CaK}相比非常小，且不随时间变化，因此我们可以假设 $I_{TL} \approx I_{CaK}$。尖峰间隔$^{-1}$ 的减小与 I_{TL}的增加一一对应。对所有 I_{syn} 幅值（200–600 皮安）下尖峰间隔$^{-1}$ 随时间的变化趋势，均采用指数衰减函数进行拟合（图 3d）。提取的参数——初始尖峰频率（f_0）、稳态尖峰频率（f_{ss}）和衰减时间常数（τ_{SFA}）——与计算得到的频率适应因子一同绘于图 3e。随着 I_{syn} 增加（上图），f_0 和 f_{ss} 均增大，其中 f_{ss} 表现出饱和，因而 f_{adap} 增大，如下图所示。值得注意的是，正如预期，τ_{SFA} 基本保持不变，且独立于 I_{syn}，因为它由 D0-C_{CaK} 对的时间常数决定。

$$f_{adap} = (f_0 - f_{ss})/f_0$$

除尖峰频率适应外，同一电路还能够响应抑制性（负）I_{syn}而诱发抑制后反弹行为。抑制后反弹是指神经元的抑制性电流输入结束后，其膜电位出现过冲。根据反弹电位的幅度，神经元可能产生一个或多个尖峰。抑制后反弹是一种重要的神经元行为，有助于执行认知和短时记忆保持等复杂任务[44-47]。图3f显示了250 ms时I_{syn} = -100 pA脉冲结束后的V_M 响应。记录到多个尖峰，且在V_M 逐渐回落至V_{rest}之前，尖峰间隔逐渐增大。插图显示了较小负值I_{syn} （-10至-30 pA）下的抑制后反弹，这些值不足以产生尖峰。V_M 随时间逐渐弛豫，表明反弹信号主要由电容器C_{CaK} 中存储的过量负电荷触发，而该负电荷会关断T_L。图3g显示了I_{syn} 取值范围为-40至-100 pA时的尖峰栅格图，表明随着I_{syn}变得越来越负，尖峰数和尖峰率都会增加。峰值尖峰间隔I^{-1} 根据前两个尖峰之间的尖峰间隔计算；从抑制性输入结束（此处为250 ms）到最后一个尖峰出现的持续时间记为t_{end}。这些参数（峰值尖峰间隔I^{-1} 和t_{end}）绘于图3h中。峰值尖峰间隔I^{-1} 和t_{end} 均随I_{syn}趋于饱和。t_{end} 与τ_{SFA} 值的相似性表明，D0-C_{CaK} 对在诱发尖峰频率适应和抑制后反弹响应方面都发挥着关键作用。此外，尖峰的归一化衰减曲线

随着时间的推移（见 SM 图 S8），所有 I_{syn} 值对应的结果均相同，进一步证实了衰减时间常数均一（基于 D0-C_{CaK}）。

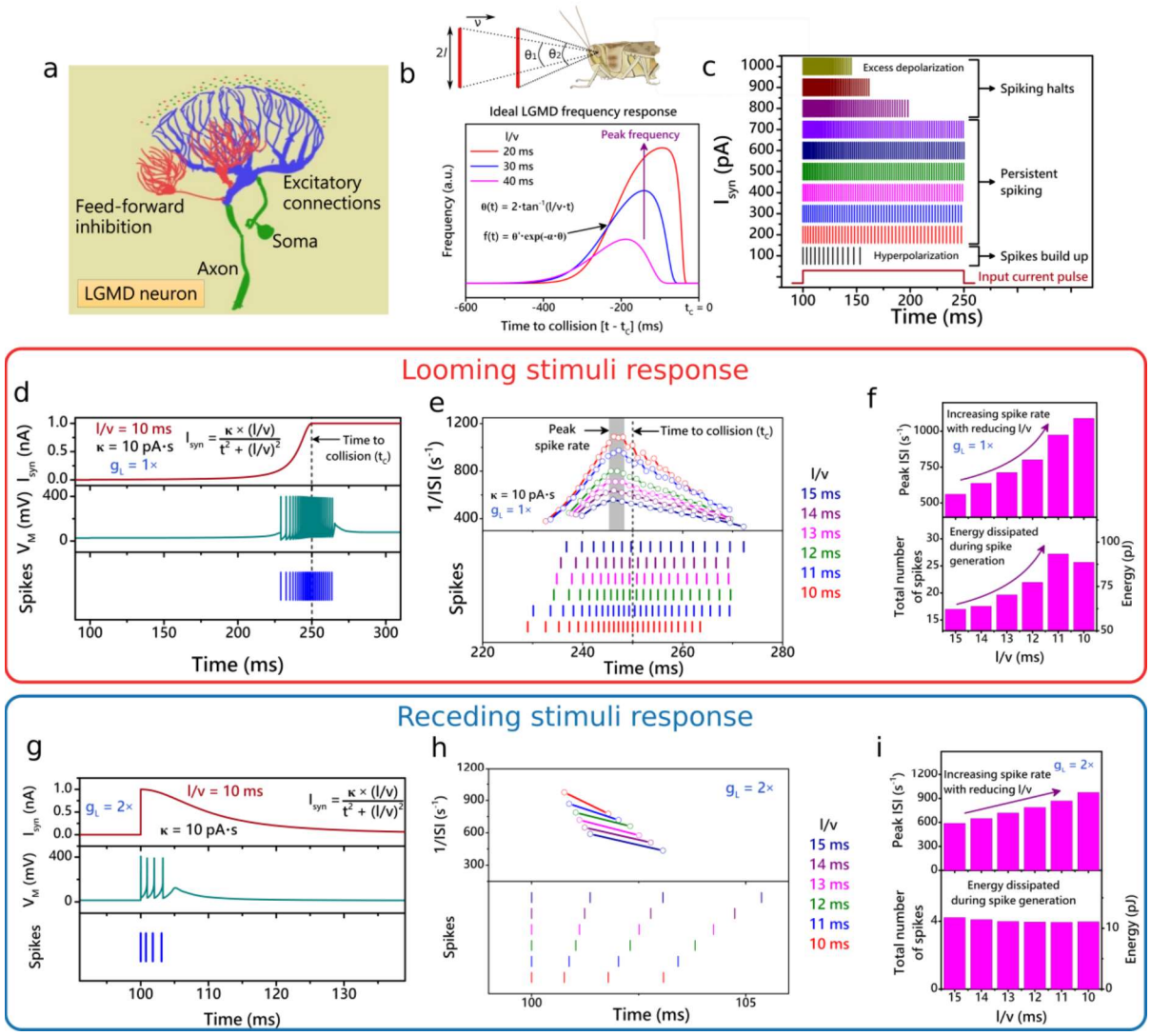


图 4. 类 LGMD 脉冲响应下的障碍物跟踪与碰撞检测。(a) 蝗虫视觉系统示意图，其中包含叶 lobula 巨大运动检测器（LGMD）神经元。(b) LGMD神经元利用 θ 和 θ’进行复杂计算，根据物体的尺寸 (l) 和速度 (v) 触发逃逸响应。LGMD神经元的放电模式可近似表示为 $f(t) = \theta' \exp(-\alpha\theta)$。l/v 越小，表示威胁越大，诱发的响应也越强。(c) 绘制了图3a所示具有尖峰频率适应和抑制后反弹的神经元在一系列 I_{syn} 振幅（100-1000 pA）下的放电模式。I_{syn} 为较低值 100 pA 时，由于 I_{CaK}导致过度超极化，尖峰发放中断。在中等 I_{syn} 值（200-700 pA）下观察到持续脉冲发放。I_{syn} 较高（800-1000 pA）时，由于膜过度去极化，尖峰发放停止。这些特性与抑制后反弹共同作用，使人工神经元能够较为逼真地模拟 LGMD 行为。(d) 电路对 I_{syn} 脉冲的响应（V_M 和栅格图）；该脉冲持续 100-250 ms，用于模拟逼近刺激下输入 LGMD神经元的突触电流。碰撞时间 (t_C) 设为 250 ms，此后突触电流保持恒定。(e) 对于与 (d) 类似的 I_{syn} 输入，在一系列 l/v 值下的瞬时尖峰率（上）和尖峰时间（下）。每种情况下，峰值脉冲率均在 t_C之前达到。(f) 随着 l/v 减小，峰值 ISI^{-1} 和尖峰总数（因此也包括能量）增加，表明威胁更大的输入会触发更强的响应，但能量消耗也更高。(g-i) 对远离刺激进行的类似数据分析，如 (d-f) 所示，并采用 2× 漏电导 (g_L)。

模拟叶 lobula 巨大运动检测器（LGMD）的响应许多

昆虫甚至大型动物的视觉神经通路中都含有用于障碍物检测的专门神经元。这些神经元能够检测朝自身移动的物体，并在根据来袭物体的速度和方向判断存在碰撞可能性时，触发高放电率。在神经生物学中，这类计算对能量、面积和时间都极为敏感。蝗虫等小型昆虫演化出了紧凑且高效的碰撞检测神经元，例如 LGMD。单个 LGMD 能在很短的时间内（通常为几毫秒）检测来袭物体的碰撞，同时以良好的能效完成涉及物体大小、位置和速度动态变化的复杂计算。图 4a 展示了 LGMD神经元以及重要的树突树和神经元。包含侧向抑制和前馈抑制的大型树突网络是 LGMD 运作的重要组成部分。另一个神经元——下行对侧运动检测器（DCMD）——同样是该系统的重要组成部分，它接收来自 LGMD 的输入，并可在检测到碰撞时触发运动神经元。基于 LGMD神经元行为的神经形态算法已应用于移动机器人和汽车应用中的障碍物检测与规避[48-51]。图 4b 展示了 LGMD 如何根据物体在蝗虫视野中所形成角度的动态变化，计算一个复杂函数（以尖峰率编码）。时间轴以碰撞时间（t_C）为基准绘制。θ 取决于物体的大小（l）和速度（v），表示为 $\theta(t) = 2\tan^{-1}(l/v \cdot t)$。LGMD神经元的放电率可用表达式 $f(\theta) = \theta' \cdot \exp(-\alpha\theta)$ 估算。这里，参数 l/v 决定尖峰响应，因此较小的 l/v（体积较小但移动较快的物体）会引发更高的放电率，意味着威胁更大。

生物 LGMD 神经元具有许多特征，如尖峰频率适应、抑制后反弹、后超极化电位、对小输入电流的初始簇发响应，以及尖峰停止[29]。要在人工神经元中重现这些功能，从而以高速度和高能效近似 LGMD 响应，这一点至关重要。图3a中的电路能够重现上述所有特征，因此可结合恰当的输入电流建模来实现复杂的 LGMD 行为。图 4c 展示了电路对范围较广（100-1000 pA）的 I_{syn} 幅值的响应。当 I_{syn} 值较小（100 pA）时，在 I_{CaK}增大导致超极化过强、尖峰活动停止之前，只记录到数量有限的尖峰。这与输入兴奋相对较小时 LGMD 的行为十分相似。另一方面，当 I_{syn} 值处于中间范围（200-700 pA）时，尖峰活动在整个电流脉冲期间持续，并伴有尖峰频率适应。最后，当 I_{syn} 值较大（800-1000 pA）时，尖峰活动会因去极化过强而停止；当接近 t_C时，这有助于根据突触电流的大小实现放电率下降。

LGMD神经元输入树突网络为逼近（接近）物体产生的突触电流，可根据逼近物体的角大小（θ）建模为 $I_{syn} \propto \theta'$，并可用参数 l/v 表示为 $I_{syn}(t) = \kappa \cdot (l/v) \quad t^2+(l/v)^2$，其中 κ 为比例常数[39]。图4d显示了神经元电路的 V_M 响应（中图），以及 I_{syn}(t~~) 波形~~（上图）对应的栅格图（下图）；其参数为 κ = 10 pA·s、l/v = 10 ms 和 t_C = 250 ms。每次仿真中，输入电流都在初始延迟 100 ms 后施加，以使电路恢复至静息状态。模仿生物 LGMD，当输入电流（即逼近刺激所代表的威胁）足够大时，人工神经元便会发放尖峰。尖峰率（尖峰间隔$^{-1}$）在 I_{syn}达到其最大值（接近 t = t_C ）之前达到峰值，随后下降。右侧的图以放大的时间轴（210–290 ms）显示相同数据，以便更清晰地观察。采用 t_C = 250 ms 对多个 l/v 值（10–15 ms）重复了相同实验，尖峰响应以栅格图形式显示于图4e（下图）

），相应的瞬时尖峰间隔$^{-1}$ 值则绘于上图。与生物 LGMD 中观察到的情况相同，随着 l/v 减小（威胁增大），峰值脉冲率单调增加。此外，峰值尖峰间隔$^{-1}$ 在 t_C之前达到，表明每种情况下都成功检测到了碰撞。

图 4e 中各情况下产生的峰值尖峰间隔$^{-1}$ 绘于图4f上图。整个 I_{syn} 信号持续期间的尖峰总数及相应的能量耗散绘于下图。随着 l/v 值减小，尖峰数增加、尖峰率升高，这表明碰撞威胁加剧，同时能耗也更高。在超过 300 ms 的时间内，电路耗散的总能量在 l/v 值最小时不超过 ~100 pJ。这一观察结果表明，利用仿生神经形态解决方案，可以以极低的能耗执行计算复杂且对时间敏感的任务。记录到的 ~100 pJ 能量消耗以及 LGMD 尖峰响应，与当代有关模拟 LGMD 运作的研究[30,31]相比，既降低了功耗，也提高了脉冲神经网络中的集成便利性。电路对远离物体的响应（类似于图 4d-f）见补充材料图S9。模拟远离物体的 I_{syn} 尖峰响应表现为尖峰数更少、响应持续时间更短。这些特征在生物 LGMD神经元中也有所体现，使其能够区分接近和远离的物体[28]。如前所述，对碰撞敏感刺激的内在选择性增添了另一层安全保障，并可确保快速响应，同时减少能量耗散。此外，如补充材料图S10所示，通过适当选择传感器比例常数κ，还可进一步调节对应逼近刺激的 I_{syn} 尖峰行为（对于相同的 l/v 值）。这种调节可使该电路用于能耗受限的应用（尖峰率较低、能量耗散较小），或需要时间关键型响应的应用（尖峰率较高、能量耗散较大），而无需对神经元电路进行任何物理改动。通过选择漏电晶体管 T_L的适当电导 g_L，还可进一步调节人工神经元电路的尖峰响应。补充材料图S11展示了随着漏电导增加，尖峰数和峰值尖峰间隔$^{-1}$ 如何从选择性响应逼近刺激转变为仅响应远离刺激（对逼近刺激不产生尖峰）。通过电路设计调节选择性，可构建神经元网络，完整提供物体的速度和运动类型（逼近与远离）信息。图4g-i展示了电路对远离刺激的响应：随着 l/v 值降低，峰值尖峰间隔$^{-1}$ 单调增加，而尖峰数保持不变，因此耗散能量为 ~11 pJ。输出中的瞬时及峰值尖峰间隔$^{-1}$ 值与尖峰数相结合，可实现对物体逼近和远离运动的精准检测与跟踪，并具有很高的能效。

结论总而言之，

nov

已展示静电控制二维沟道晶体管的亚阈值工作及其在仿生人工神经元设计中的应用。研究表明，器件运行不受二维沟道材料及其主要输运极性（n 型或 p 型）的影响。通过两个栅极偏压（V_{GC}、V_{GB}）可对二维亚阈值晶体管进行静电控制，从而产生可调的低电流钟形亚阈值电流，模拟生物神经元中观测到的钠通道电流。二维亚阈值晶体管亚阈值工作时的器件电流，已通过由 V_{GC} 控制的越势垒热发射电流和由 V_{GB} 控制的 Fowler-Nordheim 隧穿电流进行建模与拟合。进一步依据二维亚阈值晶体管的几何尺寸进行计算，验证了这些基于物理机制的拟合结果。采用 45 nm 工艺设计套件元件和二维亚阈值晶体管设计的电路，其仿真结果显示，该电路的神经元运行特性与生物神经元的 Hodgkin-Huxley 模型高度吻合。观测到的单次尖峰能量低至 ~3.5 pJ，且

对于 I 类脉冲行为，尖峰率单调递增。适当调整漏电流元件后，同一电路也可用作振荡神经元。此外，通过模拟 Ca^{2+} 激活的 K 通道极化电流（该电流同时控制尖峰率和膜电位弛豫时间尺度），对电路进行改进，以展示尖峰频率适应和抑制后反弹行为。尖峰频率适应和抑制后反弹是生物碰撞检测 LGMD 神经元的重要功能。蝗虫等昆虫的 LGMD 对逼近（靠近）物体敏感，并可根据物体的大小和速度触发脉冲频率编码放电模式，以指示可能的碰撞威胁。研究表明，采用二维亚阈值晶体管的人工神经元电路能够实现 LGMD 神经元的所有重要功能。仿真结果表明，该人工神经元能够在碰撞发生前很早就检测到逼近物体，所需尖峰数量有限，总能量消耗低于 ~100 pJ。与生物 LGMD 神经元类似，同一电路还能区分逼近刺激和远离刺激。此外，通过调节 LGMD 神经元电路对逼近物体与远离物体的响应选择性，为实时多目标跟踪系统的设计增加了另一个自由度。这项工作有望用于基于脉冲神经网络的自动驾驶车辆低功耗障碍物跟踪与避障。此外，它还可用于实现节能型脉冲或振荡神经元网络，以及涉及尖峰频率适应或抑制后反弹功能的动态感觉与记忆系统应用。

方法

器件制备。器件制备于4英寸Si/(285纳米)SiO_2 衬底晶圆上。首先，使用Raith 150-Two电子束光刻（EBL）系统对沟道栅极（G_C）和势垒栅（G_B）进行图案化。根据设计，两个G_B 电极在EBL过程中被短接。栅电极采用Cr/Au（3/30纳米）金属化工艺，在AJA International的ATC Orion（7靶溅射系统）中完成，随后进行剥离工艺。从SPI Supplies购买的晶体上取下薄片，并在胶带上机械剥离出六方氮化硼和二维沟道材料（MoS_2, WSe_2, WS_2）薄片。随后，采用聚二甲基硅氧烷（PDMS）辅助干法转移，将这些六方氮化硼和二维沟道材料薄片转移到衬底上，并在显微镜物镜下与结构局部对准。接着，使用EBL对源漏（S/D）电极进行图案化，使其与两侧的G_B重叠。这有助于通过G_B更好地控制接触势垒。最后，对于n型MoS_2 和WS_2器件，采用溅射工艺沉积Cr/Au（3/100纳米）；对于p型WSe_2 器件，则溅射沉积Cr/Pt/Au（3/30/100纳米），作为源漏接触。

器件表征。使用 Oxford Instruments 的 MFP-3D 系统对 MoS_2 和六方氮化硼薄片进行了原子力显微镜测量。所有稳态电学数据均在环境条件下使用 Keysight 的 B1500A半导体器件参数分析仪模块记录。通过同时扫描 B1500A 中的两个电压通道，记录了钟形曲线。

电路仿真与分析。所有电路仿真均使用 Spectre（Cadence）完成。二维突触晶体管测量所得的缩放数据作为 Verilog-A模型输入。所有晶体管和 MOS电容器均取自通用 45纳米工艺设计套件（gpdk045）。结果以逗号分隔值（csv）文件的形式收集，并在 MATLAB 中处理，以便进行后续分析和参数提取。

致谢SL感谢以下资助

持：印度政府科学技术部（DST）（DST/SJF/ETA-01/2016-17）。BR感谢英国工程与物理科学研究委员会（EPSRC）的资助（EP/X011356/1）。

作者 贡献KT 提出了器件构想

a

nd 并完成了器件的制备和表征。KT、BR 和 SL 讨论并分析了器件数据。KT、BR 和 SL 制定了电路仿真方案。KT 进行了仿真，并与 BR 和 SL 一起分析了数据。所有作者均讨论了结果并撰写了稿件。SL 和 BR 指导了这项研究。

补充信息二维薄片的原子力显微镜扫描,

物理学-b

基于亚阈值区器件特性的拟合、WS_2 沟道晶体管的电学特性、Hodgkin-Huxley模型的等效电路响应、人工神经元的漏积分发放响应、未采用WSe_2 晶体管偏置缩放时的人工神经元行为、电路仿真所用元件规格的详情、抑制后响应衰减分析、LGMD对远离刺激的响应、对逼近和远离刺激的响应调谐、通过漏电通路电导调谐LGMD响应。

参考文献

1 Schuman, C. D. 等. 神经形态计算算法与应用的机遇。《自然·计算科学》2, 10-19 (2022). 2 James, C. D. 等. 神经启发与神经形态计算应用的算法和硬件架构历史综述。《生物启发认知架构》19, 49-64 (2017). 3 Bohnstingl, T., Scherr, F., Pehle, C., Meier, K. & Maass, W. 神经形态硬件学会学习。《神经科学前沿》13 (2019). 4 Indiveri, G. & Horiuchi, T. K. 神经形态工程前沿。《神经科学前沿》5 (2011). 5 Pfeiffer, M. & Pfeil, T. 脉冲神经元深度学习：机遇与挑战。《神经科学前沿》12 (2018). 6 Göltz, J. 等. 基于首次脉冲时间的快速节能神经形态深度学习。《自然·机器智能》3, 823-835 (2021). 7 Harrison, R. R. 一种用于视觉碰撞检测的生物启发型模拟集成电路。IEEE《电路与系统学报I：常规论文》52, 2308-2318 (2005). 8 Zhang, C., Lindner, S., Antolovic, I., Wolf, M. & Charbon, E. 一种具有碰撞检测功能、配备128个动态重新分配时间数字转换器的互补金属氧化物半导体单光子雪崩二极管成像器，用于单光子计数和三维飞行时间成像。《传感器》18, 4016 (2018). 9 Liu, Y. H., Zhu, L. Q., Feng, P., Shi, Y. & Wan, Q. 基于壳聚糖膜上横向质子耦合晶体管的自支撑人工突触。《先进材料》27, 5599-5604 (2015). 10 Zhou, F. 等. 用于神经形态视觉传感器的光电阻变随机存取存储器。《自然·纳米技术》14, 776-782 (2019). 11 Wang, Y. & Frost, B. J. 鸽子圆形核中的神经元发出碰撞时间信号。《自然》356, 236-238 (1992). 12 Rind, F. C. 蝗虫脑中发出即将碰撞信号的神经元的细胞内特性。《神经生理学杂志》75, 986-995 (1996). 13 Preuss, T. 决策运动回路中物体接近的神经表征。《神经科学杂志》26, 3454-3464 (2006). 14 Tammero, L. F. & Dickinson, M. H. 在果蝇（Drosophila melanogaster）中，避碰反应与着陆反应由不同通路介导。《实验生物学杂志》205, 2785-2798 (2002). 15 Oliva, D. n., Medan, V. & Tomsic, D. 蟹（Chasmagnathus granulatus，十足目：方蟹科）对逼近刺激的逃逸行为和神经元反应。《实验生物学杂志》210, 865-880 (2007). 16 Gray, J. R., Blincow, E. & Robertson, R. M. 蝗虫中的一对运动敏感神经元对逼近物体的接近进行编码。《比较生理学杂志A》196, 927-938 (2010). 17 Gabbiani, F., Krapp, H. G., Koch, C. & Laurent, G. 对逼近敏感的视觉神经元中的乘法计算。《自然》420, 320-324 (2002). 18 Vincent, T. 等. 石墨烯以外可电调二维材料的机遇：近期进展与未来展望。《应用物理评论》8, 041320 (2021). 19 Thakar, K. & Lodha, S. 静电可重构双极性与反双极性传输实现的多位模拟传输。《ACS纳米》15, 19692-19701 (2021). 20 Wang, H. 等. 超薄碲化镓中的栅极可调巨型各向异性电阻。《自然·通讯》10 (2019).

21 Miao, J. 等. 基于二维/三维范德华界面的栅极可调半导体异质结。《Nano Letters》20, 2907-2915 (2020). 22 Ghosh, S., Varghese, A., Thakar, K., Dhara, S. & Lodha, S. 利用静电可调平面横向p-n同质结提升快速WSe2光晶体管的响应度和探测率。《自然·通讯》12 (2021). 23 Ghosh, S. 等. 通过能带排列工程，在具有高负响应度的高速WSe2/SnSe2二极管中实现极性可调光电流。《ACS纳米》16, 4578-4587 (2022). 24 Xu, Y. 等. 黑磷的场诱导n型掺杂：用于具有高电子迁移率的CMOS兼容二维逻辑电子学。《先进功能材料》27, 1702211 (2017). 25 Xiong, K. 等. 单层MoS2金属氧化物半导体场效应晶体管的CMOS兼容批量加工。《物理学杂志D：应用物理》51, 15LT02 (2018). 26 Hodgkin, A. L. & Huxley, A. F. 膜电流的定量描述及其在神经传导和兴奋中的应用。《The Journal of Physiology》117, 500-544 (1952). 27 Hodgkin, A. L., Huxley, A. F. & Katz, B. 测量枪乌贼属巨大神经轴突膜中的电流-电压关系。《The Journal of Physiology》116, 424-448 (1952). 28 Peron, S. & Gabbiani, F. 尖峰频率适应介导碰撞检测神经元对逼近刺激的选择性。《自然·神经科学》12, 318-326 (2009). 29 Gabbiani, F. & Krapp, H. G. 一种已鉴定的逼近敏感神经元的尖峰频率适应和内在特性。《神经生理学杂志》96, 2951-2962 (2006). 30 Jayachandran, D. 等. 基于存内二硫化钼光探测器的低功耗仿生碰撞检测器。《自然·电子学》3, 646-655 (2020). 31 Wang, Y. 等. 用于实时碰撞检测的基于忆阻器的仿生复眼。《自然·通讯》12 (2021). 32 Beck, M. E. 等. 由可调高斯异质结晶体管构成的脉冲神经元。《自然·通讯》11 (2020). 33 Galy, P., Bedecarrats, T., Fenouillet-Beranger, C. & Cristoloveanu, S. 载于2019年联合国际EUROSOI研讨会暨硅终极集成国际会议（EUROSOI-ULIS）。1-4（IEEE）。34 Woo, S. & Kim, S. 无外部偏置电压的单个硅纳米线神经元器件的神经振荡。《科学报告》12 (2022). 35 Sebastian, A., Pannone, A., Subbulakshmi Radhakrishnan, S. & Das, S. 用于概率神经网络的高斯突触。《自然·通讯》10 (2019). 36 Izhikevich, E. M. 脉冲神经元的简单模型。《IEEE神经网络汇刊》14, 1569-1572 (2003). 37 David, F., Crunelli, V., Leresche, N. & Lambert, R. C. 丘脑皮层神经元慢波背后的条件振荡器的动态分析。《神经回路前沿》10 (2016). 38 Neske, G. T. 皮层和丘脑网络中的慢振荡：机制与功能。《神经回路前沿》9 (2016). 39 Peron, S. P. & Gabbiani, F. 尖峰频率适应在塑造神经元对动态刺激的响应中的作用。《生物控制论》100, 505-520 (2009). 40 Salaj, D. 等. 尖峰频率适应支持对时间分散信息的网络计算。《eLife》10 (2021). 41 Fitz, H. 等. 神经元尖峰率适应支持语言处理中的工作记忆。《美国国家科学院院刊》117, 20881-20889 (2020). 42 Ha, G. E. & Cheong, E. 中枢神经系统神经元中的尖峰频率适应。《实验神经生物学》26, 179-185 (2017).

43 Prescott, S. A. & Sejnowski, T. J. 不同适应机制对尖峰率编码和尖峰时间编码产生相反影响。《神经科学杂志》28, 13649-13661 (2008). 44 Straub, V. A. & Benjamin, P. R. 摄食网络中的外在调制与运动模式生成：一项细胞研究。《神经科学杂志》21, 1767-1778 (2001). 45 Goaillard, J. M., Taylor, A. L., Pulver, S. R. & Marder, E. 缓慢且持续的抑制后反弹充当内在短期记忆机制。《神经科学杂志》30, 4687-4692 (2010). 46 Bertrand, S. & Cazalets, J.-R. 新生大鼠运动神经元体外类运动活动期间的抑制后反弹。《神经生理学杂志》79, 342-351 (1998). 47 Large, E. W. & Crawford, J. D. 听觉时间计算：基于抑制后反弹的间隔选择性。《计算神经科学杂志》13, 125-142 (2002). 48 Salt, L., Indiveri, G. & Sandamirskaya. 载于2017年IEEE国际电路与系统研讨会（ISCAS）。美国马里兰州巴尔的摩。49 Blanchard, M., Rind, F. C. & Verschure, P. F. M. J. 利用蝗虫LGMD神经元模型进行碰撞规避。《机器人与自主系统》30, 17-38 (2000). 50 Santer, R. D., Stafford, R. & Rind, F. C. 蝗虫逼近探测神经元的视网膜生成扫视抑制：使用机器人蝗虫进行的研究。《英国皇家学会界面》1, 61-77 (2004). 51 Stafford, R., Santer, R. D. & Rind, F. C. 用于汽车的仿生视觉碰撞检测机制：结合受昆虫启发的神经元，构建鲁棒系统。《生物系统》87, 164-171 (2007).

补充材料：

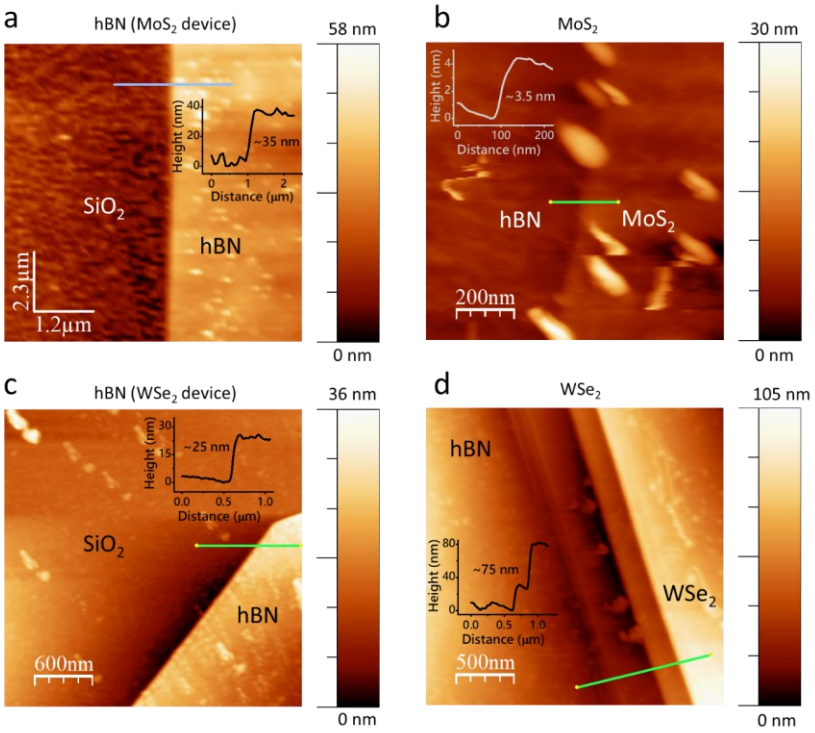
基于二维材料亚阈值晶体管的超低功耗神经形态障碍物检测

Kartikey Thakar[1], Bipin Rajendran[2], 和 Saurabh Lodha[1,*]印度理工学院孟买分校电气工程系，印度孟买。[2]伦敦国王学院工程系，英国伦敦斯特兰德。
*slodha@ee.iitb.ac.in

目录

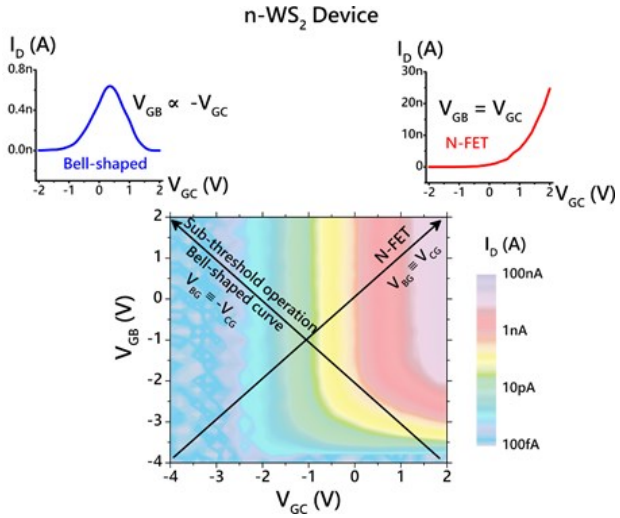
S1. MoS_2, WSe_2 和六方氮化硼薄片的原子力显微镜数据**S2.** 含 WS_2 沟道的二维亚阈值晶体管器件的电流-电压图**S3.** 钟形电流-电压曲线的基于物理的拟合**S4.** Hodgkin-Huxley（HH）模型等效电路响应**S5.** 人工神经元的漏积分发放行为**S6.** 未对 WSe_2 晶体管进行栅极偏压缩放的漏积分发放神经元（电阻-电容）**S7.** 电路仿真所用元件规格的详细信息**S8.** PIR响应中衰减动力学的缩放**S9.** 电路对远离刺激的响应**S10.** 逼近和远离刺激的尖峰响应调节**S11.** 对逼近或远离刺激的选择性

S1节。　MoS的原子力显微镜数据$_2$, WSe$_2$ 和六方氮化硼薄片



图S1。原子力显微镜图像及线扫描，显示（**a**）六方氮化硼（MoS$_2$ 器件）、（**b**）MoS$_2$，（**c**）六方氮化硼（WSe$_2$ 器件）和（**d**）WSe$_2$ 薄片的厚度。

S2节。　具有WS$_2$ 沟道的二维亚阈值晶体管器件的电流-电压图



图S2。显示n-WS$_2$ 2二维亚阈值晶体管器件电流随沟道和势垒栅极偏压（V_{GC}、V_{GB}）变化的伪彩色图。从电流图中沿$V_{GC} = V_{GB}$ 方向进行线扫描，可获得传统n型场效应晶体管的转移曲线。而沿相反方向（$V_{GC} \equiv -V_{GB}$）进行线扫描，则可在亚阈值工作状态下得到钟形曲线。

S3 节。　钟形电流-电压曲线的基于物理的拟合

通过同时沿相反方向扫描两个栅极偏压（V_{GC}、V_{GB}），获得了钟形电流-电压曲线。在整个电流-电压扫描过程中，器件始终工作在亚阈值区。图 S3-1a 展示了器件等效电路和能带图；该电路基于集总电阻模型，将由 V_{GC} 控制的亚阈值热发射电流与由 V_{GB} 控制的 Fowler-Nordheim（FN）隧穿电流串联表示。图 S3-1b 的电流-电压曲线上标出了各电阻（R_{FN} 和 R_{ST}）限制器件电流的工作区间。

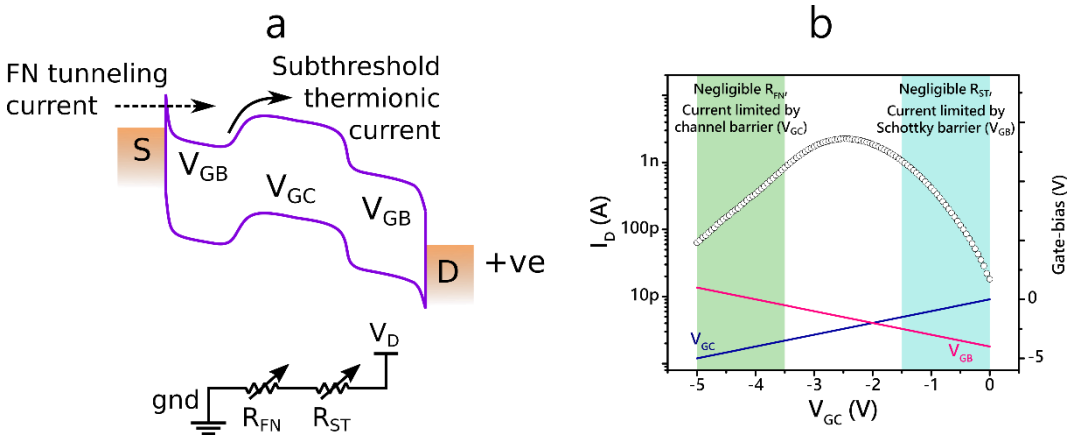


图 S3-1。 (a) 二维沟道的能带图，显示了决定流经器件电流的两个主要电流分量。底部示意图为器件的等效集总电阻模型。**(b)** MoS_2 器件在给定栅极偏压（V_{GC}、V_{GB}）信号下的钟形亚阈值电流特性。图中标出了电流分别受 V_{GC} 或 V_{GB} 限制的两个工作区间。

使用 Y函数法估算的接触电阻约为 10^6 Ω，对应于 V_D = 1V 下的 ~1 μA 电流。因此，在对峰值电流为 <10 nA 的钟形电流-电压曲线进行建模时，可以忽略集总 R_c 值。

如下文所述，两个可变电阻可以用描述各自输运机制的方程来建模。

(a) 亚阈值热发射电流（图 S3-2a）：

R_{ST} 在钟形曲线左侧占主导，此时 V_{GB} 较大（隧穿势垒较小），而 V_{GC} 较小（热发射势垒较大）。因此，器件电流可以用以下方程建模：

$$I_{ST} = A \cdot (m-1) \cdot \exp\left(V_{GC} - \frac{V_{Th}}{m \cdot \left(\frac{kT}{q}\right)}\right)$$

其中，A（电流比例常数），m（体因子）和V_{Th}（阈值电压）是拟合参数。

(b) FN隧穿电流（图 S3-2b）：

R_{FN} 在钟形曲线右侧占主导，此处 V_{GC} 较大（热发射势垒较小），而 V_{GB} 较小（隧穿势垒较大）。因此，器件电流可用以下方程组建模：

$$I_{FN} = \frac{A}{\phi}\exp\left(-B\cdot\phi^{\frac{3}{2}}\right), \text{with}$$

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi; \text{where } \Delta\phi = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon}}, \text{and } E_m = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon}(\psi - V_A)}.$$

代入 $\psi = V_{GB}/m$，可写为

$$\Delta\phi = a\cdot(V_{GB} - b)^{\frac{1}{4}}.$$

其中，A、B、ϕ_0、a 和 b 均为拟合参数。

分区域部分拟合结果如图 S3-2 所示。根据串联电阻模型，器件总电流可近似表示为

$$I = \frac{1}{\frac{1}{I_{ST}} + \frac{1}{I_{FN}}}.$$

基于上述表达式对整个栅极偏置范围内的钟形电流-电压曲线进行拟合，结果如图 S3-3 所示。

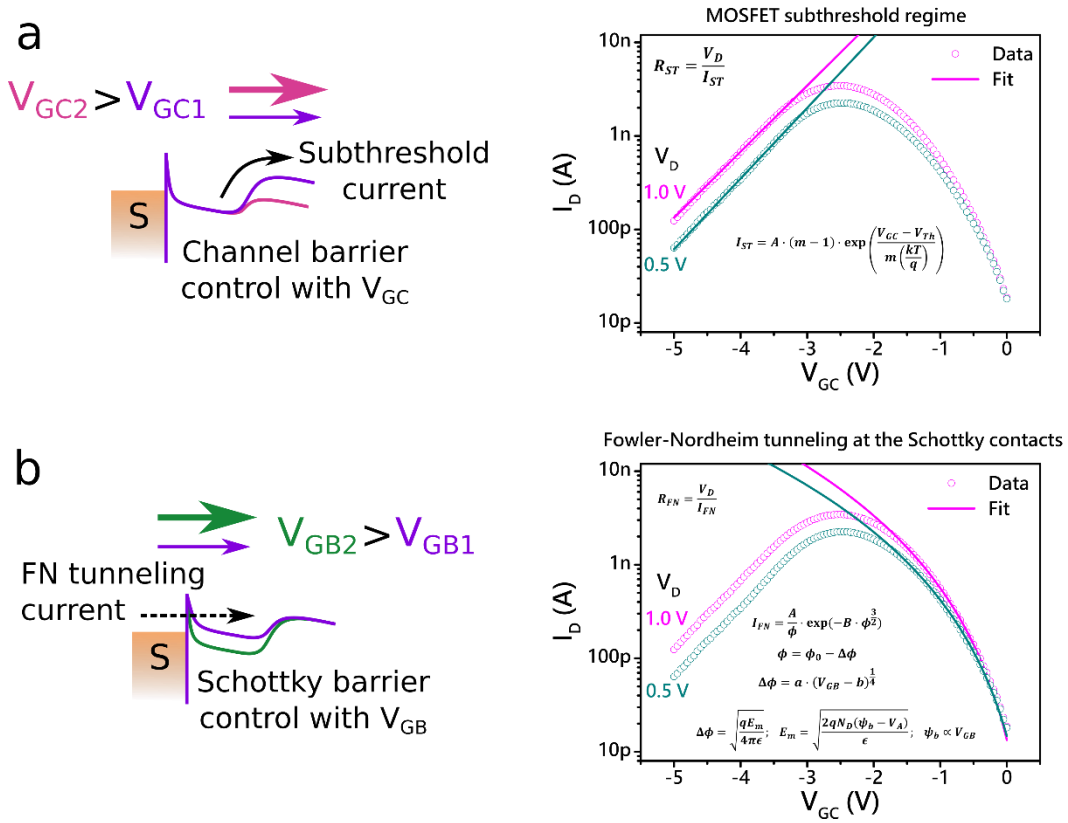


图 S3-2。 **（a）** 能带图显示越过势垒的热发射电流随 V_{GC} 的变化，以及在亚阈值区利用指数关系对电流-电压曲线进行部分拟合。**（b）** 能带图显示 FN隧穿电流随 V_{GB} 的变化，以及利用 FN隧穿方程对电流-电压曲线进行部分拟合。

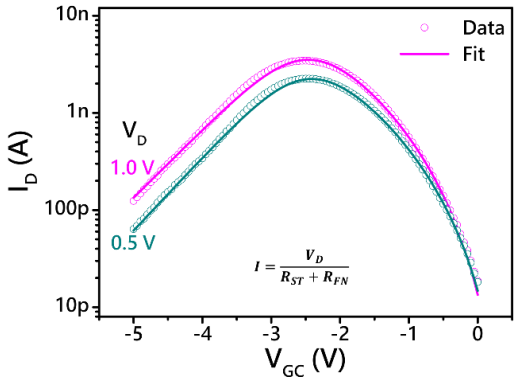


图 S3-3。 全栅极偏压范围内 I-V 曲线的拟合。

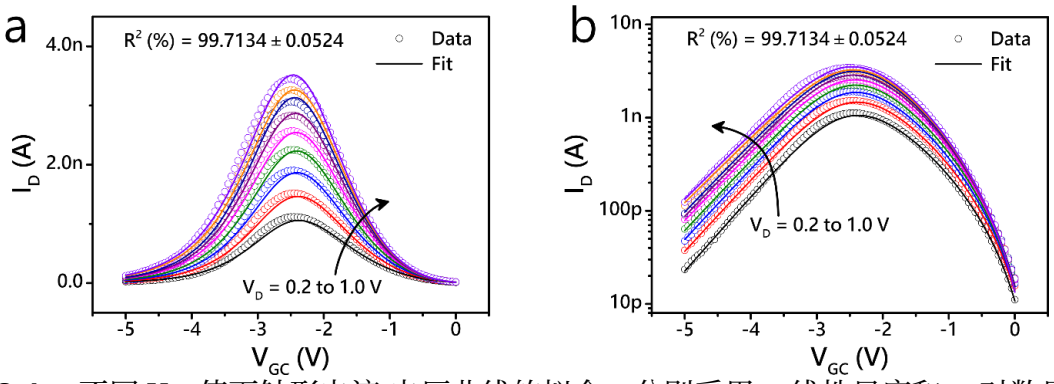


图 S3-4。 不同 V_D 值下钟形电流-电压曲线的拟合，分别采用**(a)**线性尺度和**(b)**对数尺度。

I-V 曲线（覆盖较大的 V_D 取值范围）采用上述方程进行拟合（图 S3-4），提取的重要器件参数如下。

$$m = 22.52 \pm 0.95$$
$$\phi_0 = 0.164 \pm 0.002\ eV$$

现在，根据通过原子力显微镜测量得到的六方氮化硼（~35 纳米）和 MoS_2 （~3.5 纳米）薄片厚度，并采用两种材料的介电常数值$\epsilon_{hBN} = 3.8$[1], 和 $\epsilon_{MoS2} = 8$[2]，我们可以估算

$$m = 1 + \frac{C_D}{C_{ox}} = 1 + \frac{\epsilon_{MoS2} \cdot t_{hBN}}{\epsilon_{hBN} \cdot t_{MoS2}}$$
$$\Rightarrow m = 1 + \frac{8 * 35}{3.8 * 3.5} \approx 22,$$

这与提取出的 $m = 22.52 \pm 0.95$ 值高度吻合。

接下来，将提取出的 $m = 22.52$ 和 $t_{MoS2} = 3.5$ 纳米（来自原子力显微镜测量）代入 $\Delta\phi$ 的方程，并取 $a = 0.09542 \pm 0.00259$，可得

$$a = \sqrt{\frac{q}{4\pi\epsilon_{MoS2}}} \sqrt{\frac{2qn_{2D}}{m \cdot \epsilon_{MoS2} \cdot t_{MoS2}}}, where\ N_D = \frac{n_{2D}}{t_{MoS2}}.$$

$$\Rightarrow n_{2D} \sim 4.5 \times 10^{12}\ cm^{-2}.$$

提取出的 MoS_2 的 n_{2D} 值与文献[3]一致。

S4 节。 Hodgkin-Huxley（HH）模型等效电路响应

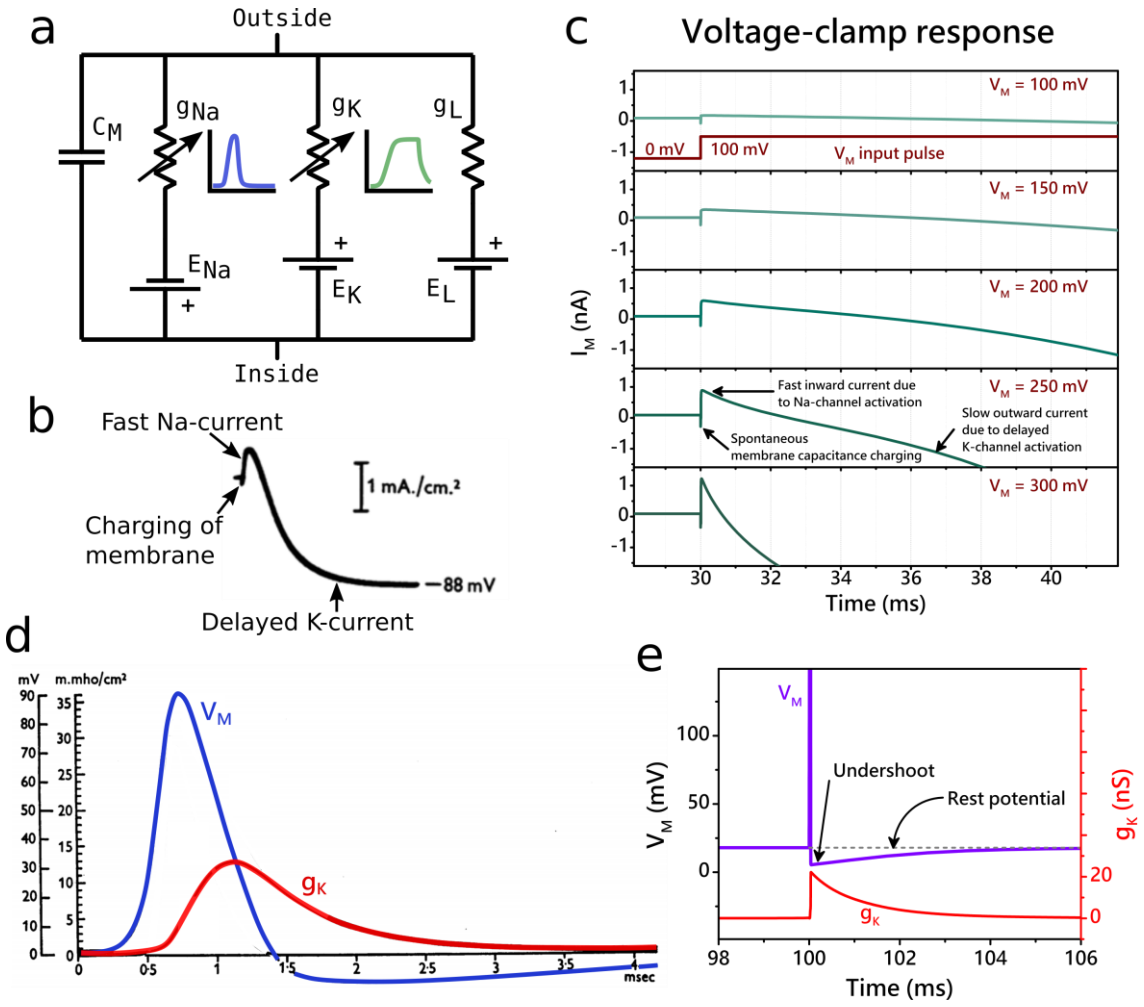


图 S4。 **(a)** 生物神经元 Hodgkin-Huxley 模型的电学等效电路，包含膜电容以及钠、钾和漏通道。 **(b)** 将膜电压（V_M）钳制在固定值时，在生物神经元中测得的膜电流。快速向内电流（此处显示为正值）由钠通道激活引起，缓慢向外电流（此处显示为负值）则由延迟的钾通道激活引起。电流幅值和时间尺度均取决于 V_M[4]。 **(c)** 电路仿真的电压钳等效结果显示，各电流分量的幅值和时间尺度取决于 V_M。这表明仿真电路与生物神经元模型相似。 **(d)** 尖峰期间的膜电位和钾电导（g_K）表明，当 g_K 变为零[5]后，膜电位会回到其静息值。 **(e)** 单个尖峰的电路仿真显示，当 g_K 弛豫至零时，V_M 在下冲后回到其静息位置。

S5 节。　人工神经元的漏积分发放行为

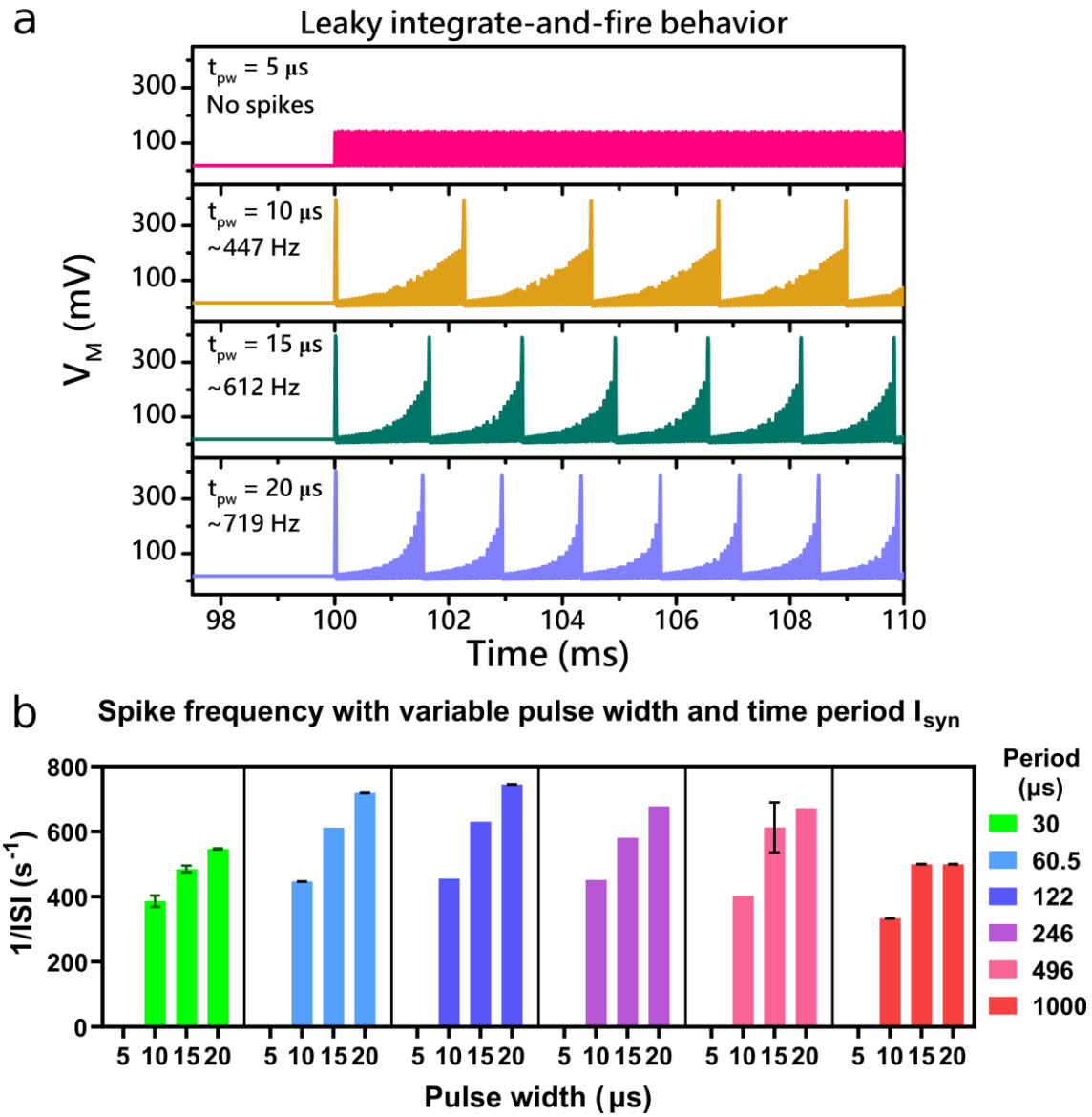


图 S5。 (a) 漏积分发放神经元行为：随着 I_{syn} 脉冲宽度增加，尖峰率也随之提高，周期为 60.5 μ秒。 **(b)** 对脉冲宽度和周期可变的 I_{syn} 脉冲的尖峰率（尖峰间隔 I^{-1}）进行汇总。增大两个连续脉冲之间的间隔会导致尖峰率降低。

S第 S6 节。　不进行栅极偏压缩放的 WSe_2 晶体管漏积分发放神经元（电阻-电容）

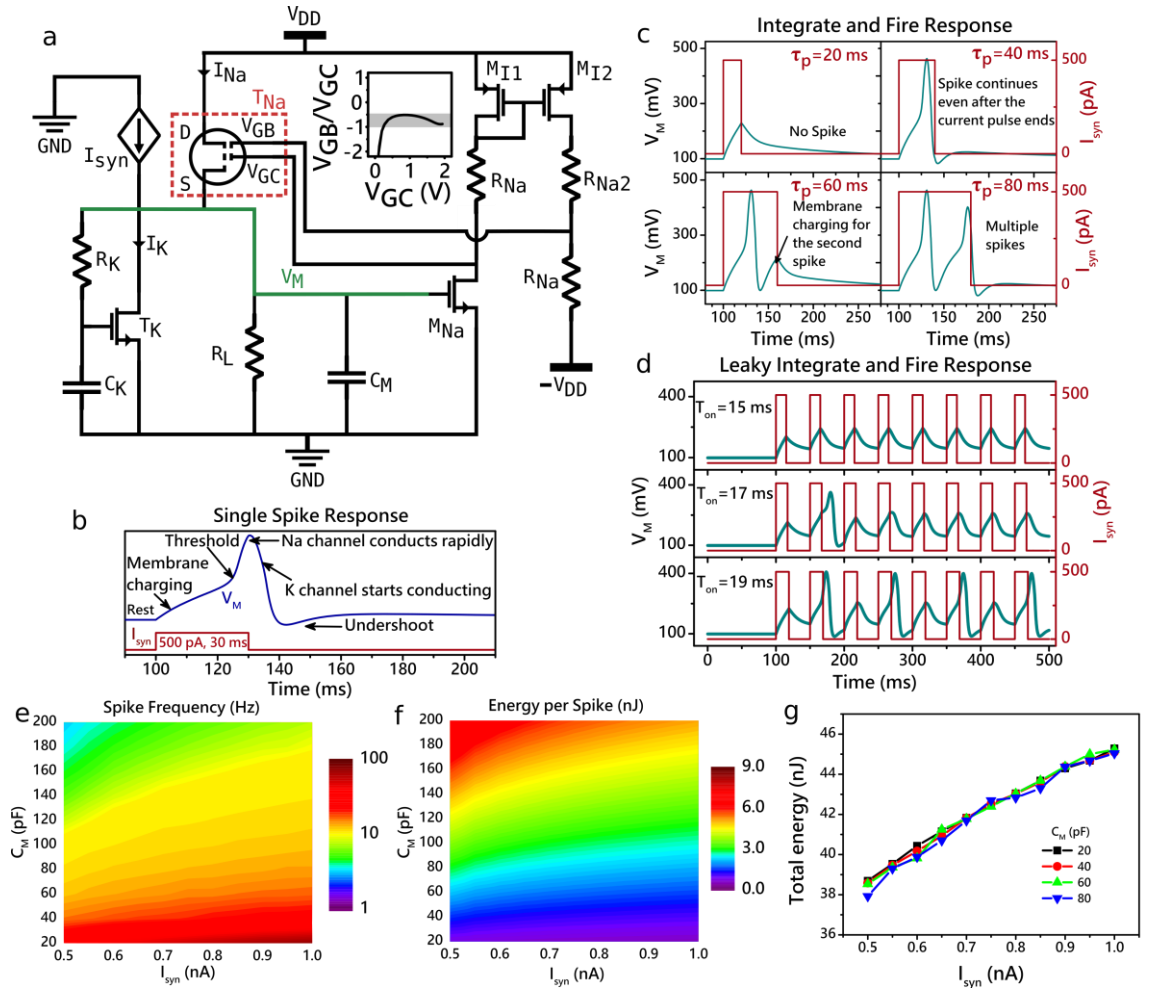


图 S6. (a) 采用二维亚阈值晶体管的神经元电路示意图，其中 p-WSe_2 (T_{Na}) 提供仿生钠通道电流。插图显示 V_{GB} 随 V_{GC} 的相对变化。电路元件的数值列于补充材料表 S7-3。**(b)** 30 ms 电流脉冲的电路仿真结果显示，电路产生单个尖峰，并呈现出生物神经元的可观察特征。进一步的电路仿真显示，当电流脉冲持续时间（t_p = 20-80 ms）变化时，电路表现为**(c)**积分发放神经元；当输入脉冲的占空比（T_{on} = 15-19 ms，T_0 = 50 ms）变化时，电路表现为**(d)**漏积分发放神经元。色彩图显示**(e)**尖峰频率、**(f)**单次尖峰能量和**(g)**总能量（在 1 秒电流脉冲期间）随输入电流幅值和电容值（C_M = C_K）的变化。测得的单次尖峰能量低至 ~500 pJ/尖峰，且总功耗不随 C_M 的变化而改变。

S7节。 电路仿真所用元件规格的详细信息 表 S7-1。图 2 中电路的元件列表

元件		库/模型	尺寸/数值	Unit
V_{DD}		analoglib/vdc	1	V
I_{syn}		analoglib/ipulse	0-1000	pA
$MP1_{Na}$		gpdk045/pmos1v_hvt_3	120/45（宽长比）	nm
$MP2_{Na}$		gpdk045/pmos1v_3	120/45（宽长比）	nm
$MN1_{Na}$		gpdk045/nmos1v_hvt_3	240/45（宽长比）	nm
$MN2_{Na}$		gpdk045/nmos1v_hvt_3	120/45（宽长比）	nm
T_L	g_{L3}	gpdk045/nmos1v_lvt_3	2400/45（宽长比）	nm
	g_{L2}		2040/45 (宽长比)	nm
	g_{L1}		1800/45 (宽长比)	nm
	g_{L0}		1080/45 (宽长比)	nm
T_K		gpdk045/nmos1v_3	240/45 (宽长比)	nm
MN_K		gpdk045/nmos1v_3	120/45（宽长比）	nm
C_M		gpdk045/nmoscap2v	50	fF
C_K		gpdk045/nmoscap2v	200	fF

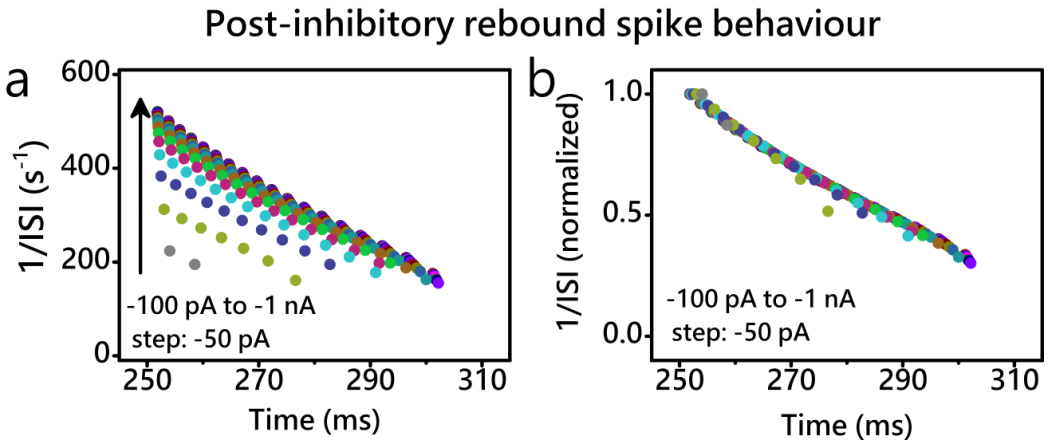
表 S7-2。图 3 中电路的元件列表

元件	库/模型	尺寸/数值	Unit
V_{DD}	analoglib/vdc	1	V
I_{syn}	analoglib/ipulse	0 至 ±1000	pA
$MP1_{Na}$	gpdk045/pmos1v_hvt_3	120/45（宽长比）	nm
$MP2_{Na}$	gpdk045/pmos1v_3	120/45 (宽长比)	nm
$MN1_{Na}$	gpdk045/nmos1v_hvt_3	240/45（宽长比）	nm
$MN2_{Na}$	gpdk045/nmos1v_hvt_3	120/45（宽长比）	nm
T_L	gpdk045/nmos1v_lvt_3	720/45（宽长比）	nm
T_K	gpdk045/nmos1v_3	240/45（宽长比）	nm
MN_K	gpdk045/nmos1v_3	120/45（宽长比）	nm
C_M	gpdk045/nmoscap2v	50	fF
C_K	gpdk045/nmoscap2v	200	fF
D0	gpdk045/ndio2v	200/200（宽长比）	nm
C_{CaK}	gpdk045/nmoscap2v	400	fF

表 S7-3。 SM 图 S6 中电路的元件列表

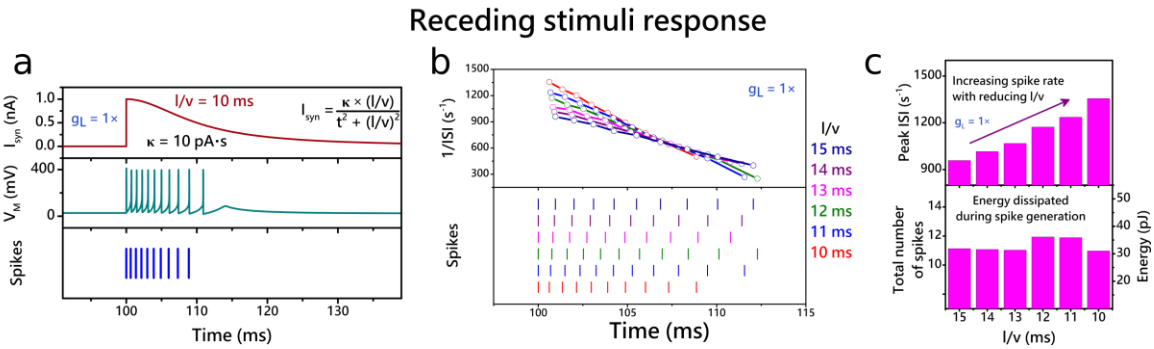
元件	库/模型	尺寸/数值	Unit
V_{DD}	analoglib/vdc	2	V
I_{syn}	analoglib/ipulse	0-1000	pA
M_{Na}	gpdk045/nmos2v	320/150（宽长比）	nm
R_{Na}	analoglib/res	125 M	Ω
R_{Na2}	analoglib/res	135 M	Ω
M_{I1}, M_{I2}	gpdk045/pmos1v	120/45 (宽长比)	nm
T_K	gpdk045/nmos2v	320/150 (宽长比)	nm
R_K	analoglib/res	300 M	Ω
R_L	analoglib/res	5 G	Ω
C_M	analoglib/cap	50	pF
C_K	analoglib/cap	50	pF

S8节。 PIR响应中衰减动力学的缩放



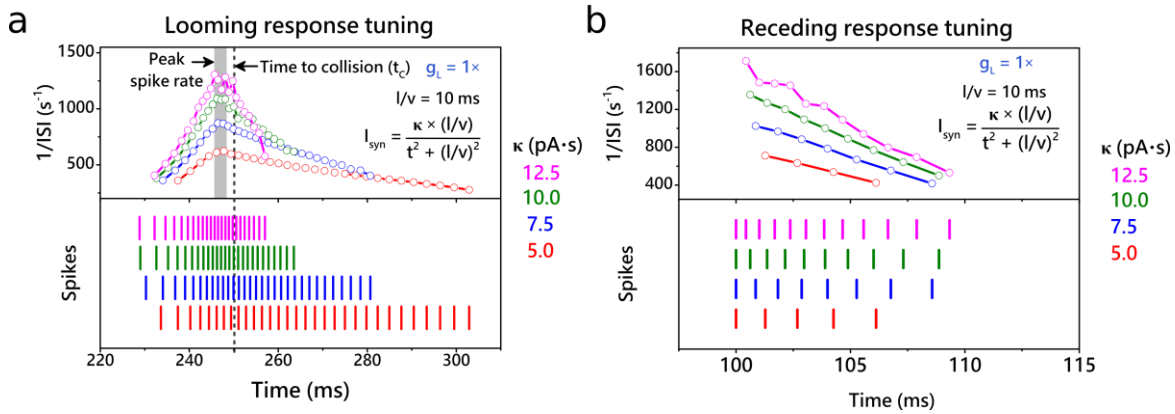
图S8。 **(a)**抑制性输入后，瞬时尖峰率随时间变化，并显示出在短时间内的衰减。**(b)**每种 I_{syn} 幅值对应的归一化尖峰率呈现单一斜率，表明这种均匀的衰减行为与时间或 I_{syn}无关。

S9节。 远离刺激下的电路响应



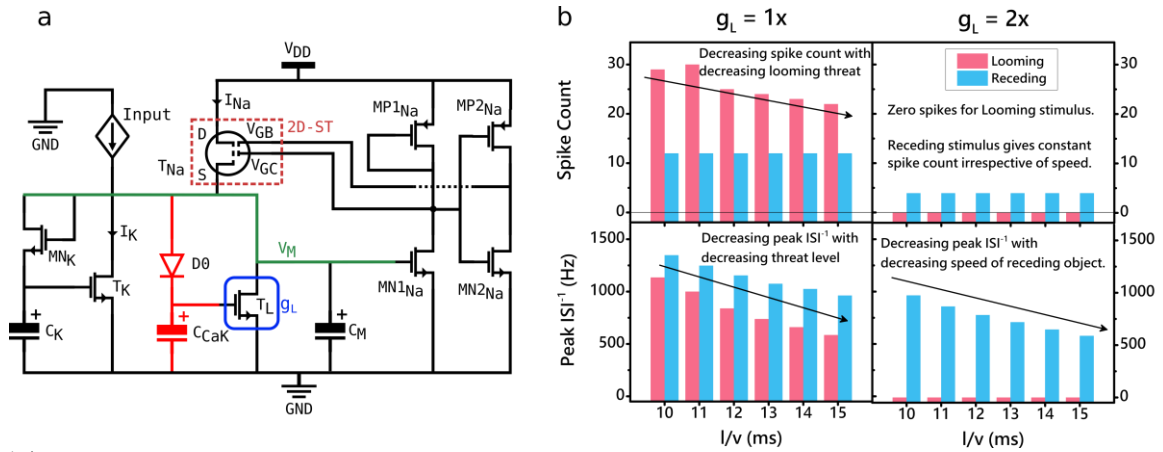
图S9。 **(a)**对于模拟远离刺激下输入LGMD神经元的突触电流 I_{syn} ，电路的响应（V_M 和栅格图）。**(b)**对于一系列 *l/v* 值，与(a)类似的 I_{syn} 输入所产生的瞬时尖峰率（上）和尖峰时间（下）。**(c)**随着 *l/v* 减小，峰值ISI^{-1} 增加，表明大幅度运动的输入会触发增强的响应。然而，尖峰总数（以及能量）并不改变，这有助于LGMD响应本质上区分逼近响应和远离响应。

S10节。 逼近和远离刺激的尖峰响应调谐



图S10。通过在突触电流中设定适当的比例常数（κ），可调节远离刺激的频率响应，从而调整峰值放电率和尖峰活动持续时间。图中显示了逼近刺激（a）和远离刺激（b）在一系列κ 值下的瞬时尖峰间隔$^{-1}$ 和尖峰时序。

S11节。 逼近或远离刺激的选择性



图S11。 **(a)**尖峰神经元电路与图3a所示相同。突出显示了电导为g_L 的漏电通路晶体管T_L 。**(b)**对于逼近和远离刺激（*l/v* = 10 $_L$ = 1× $_L$ = 2×毫秒），在不同相对电导值g和g下，I_{syn} 输入对应的尖峰数（上）和峰值ISI^{-1} （下）。随着威胁等级降低（*l/v*增大），峰值ISI和尖峰数均会减少。值得注意的是，当gL = 2×时，逼近刺激响应的尖峰数为零，因此其响应仅对远离刺激具有选择性。利用g_L 进行这种调谐，有助于实现方向选择性（逼近与远离）的目标跟踪。

参考文献

1 Laturia, A., Van de Put, M. L. & Vandenberghe, W. G. 六方氮化硼和过渡金属二硫属化物的介电性质：从单层到块体。*npj 2D Materials and Applications* **2** (2018年)。2 Kang, Y., Jeon, D. & Kim, T. MoS_2厚度依赖介电常数的局部映射。*The Journal of Physical Chemistry C* **125**, 3611-3615 (2021年)。3 English, C. D., Shine, G., Dorgan, V. E., Saraswat, K. C. & Pop, E. 通过超高真空金属沉积改善 MoS_2 晶体管的接触。*Nano Letters* **16**, 3824- 3830 (2016年)。4 Hodgkin, A. L., Huxley, A. F. & Katz, B. 枪乌贼属巨大神经轴突膜的电流-电压关系测量。*The Journal of Physiology* **116**, 424-448 (1952年)。5 Hodgkin, A. L. & Huxley, A. F. 膜电流的定量描述及其在神经传导和兴奋中的应用。*The Journal of Physiology* **117**, 500- 544 (1952年)。