

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.04.005

基于肖特基势垒调控的低能耗有机突触晶体管*

陈天健, 陈惠鹏**

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘 要: 利用n型有机半导体材料N2200掺杂在p型有机半导体材料PDVT-10中形成捕获中心而能够表现出突触行为的特性,结合银金属作为源电极与有机半导体PDVT-10接触形成的金属-半导体结来引入肖特基势垒,从而使其限制有机突触器件的源漏电流,最终降低器件工作能耗。此外,器件表现出生物突触行为时的工作电流均在 10^{-10} A量级,如兴奋性突触后电流等基础的突触行为。研究方案为构建类脑水平的神经形态计算网络提供了一种简单高效的策略。

关键词: 肖特基势垒;神经形态器件;低能耗

中图分类号: TN386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)04-0305-06

Low-energy-consumption Organic Synaptic Transistors Enabled by Schottky Barrier Regulation

CHEN Tianjian, CHEN Huipeng

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract: In the study, n-type organic semiconductor material N2200 was doped in p-type organic semiconductor material PDVT-10 to form a trapping center with synaptic characteristics. Metal semiconductor junction formed by contact between organic semiconductor PDVT-10 and silver metal as the source electrode was combined to introduce Schottky barrier, so as to limit the source-drain current of organic synaptic devices, and finally reduce device energy consumption. In addition, the operating current of the devices exhibiting biological synaptic behavior was on the order of 10^{-10} A, such as excitatory postsynaptic current and other basic synaptic behavior. The scheme has provided a simple and efficient strategy for constructing brain-like neuromorphic computing networks.

Key words: Schottky barrier; neuromorphic device; low energy consumption

引 言

人脑依靠突触连接神经元,因而具有学习、记

忆、自适应等能力。一个巨大的神经网络(10^{15} 个突触)可以让人脑在消耗少量功率(≈ 20 W)的情况下进行并行运算^[1-2]。相比之下,冯·诺依曼的传统架

收稿日期:2023-04-03

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61974029);国家重点研发计划项目(2016YFB0401103)

作者简介:陈天健(1996—),男,硕士研究生,研究方向为神经形态有机突触晶体管;

陈惠鹏(1981—),男,研究员,主要从事半导体材料器件及应用,神经形态显示等方面的研究。(E-mail: hpchen@fzu.edu.cn)

** 通讯作者

构中所用的计算数据需要从独立的存储单元传输出来,其计算效率因此受到限制,并产生了较高的能量消耗^[3-4]。因此,受到人类大脑的启发,模拟突触对刺激反应的设备可以有效地减少工作时的能量消耗。有机突触晶体管(OSTs)可以提供额外的终端(栅电极)来调节外部信息,因此它们具有受外界刺激而调节自身电流水平的能力,类似于生物突触。然而,大多数有机人工突触晶体管消耗的能量(约 100 nJ 每个突触事件)比生物突触(约 100 fJ 每个突触事件)多几个数量级^[5-7],这将导致构建类脑神经形态网络的巨大能量消耗。因此,降低单个人工突触的能量消耗对于构建低能量消耗的复杂神经形态网络至关重要。

随着更多对低能耗人工突触的需求出现,许多研究者都开始努力研发新的突触器件。例如,通过应用具有高电容耦合的电解质和铂线的组合,使得突触行为所需的工作电压从 -1 V 降低到 -50 mV,从而降低了能耗^[8]。此外,使用低导电性材料(PBTTT)作为有源层的有机突触晶体管器件表现出较低的工作电流,并以累积模式工作,以降低能耗^[9]。这与使用 PEDOT:PSS 并以耗尽模式工作的器件不同^[10]。此外,刘亚倩等人通过将双层场效应晶体管与摩擦电纳米发电机耦合,接收外部动作作为突触前尖峰,以降低突触设备的功耗^[11]。这些方法确实降低了能耗,但需要注意的是,它们都变得更加复杂,并有一定的局限性,其中大多数是基于欧姆接触的。

利用 n 型有机半导体材料 N2200 掺杂在 p 型有机半导体材料 PDVT-10 中形成捕获中心来使器件获得突触特性,制备了以有机半导体材料 PDVT-10 和 N2200 混合的 p/n 半导体异质结作为半导体层的突触晶体管,结合银金属作为源电极与有机半导体 PDVT-10 接触形成的金属-半导体结来引入肖特基势垒,降低了器件表现出 EPSC 时的源漏电流,从而降低了器件的能耗至 fJ 级别,与生物上的能量消耗一致。

1 实 验

1.1 材料准备与测试

p 型有机半导体材料 PDVT-10 购买于 1-Material。n 型有机半导体材料 N2200 购买于 Derthon OPV Co Ltd。含 100 nm 的 SiO₂ 层的硅片购买自苏州晶矽电子科技有限公司。PDVT-10 和 N2200 分别称取 5 mg 溶于 1 ml 的溶剂氯苯中,经过 12 h 加热

溶解。而后将 PDVT-10 (5 mg/ml) 以质量比 4:1 加入到 N2200 溶液 (5 mg/ml) 中,形成 p/n 半导体混合溶液。

器件的转移特性曲线、输出特性曲线以及突触性能等测试均在半导体参数分析仪 (Keysight B2912A) 完成,且为室温大气环境。

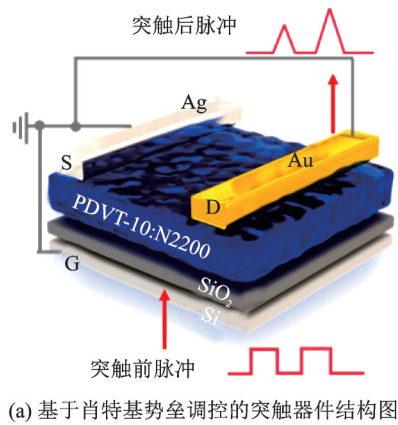
1.2 有机薄膜晶体管的制备

硅片既作为衬底,又作为栅极,上面覆盖了一层 SiO₂ 作为绝缘层;硅片经过丙酮、异丙醇、去离子水分别清洗三次;最后使用 99% 纯度的 N₂ 流吹干。将 p/n 半导体混合溶液旋涂在一个清洗干净的硅片上,旋涂参数为 1 000 r/min, 1 min。随后,放置在加热台以 60 °C 的温度退火 15 min,形成 p/n 半导体异质结层。最后通过热蒸发的方式,蒸镀 50 nm 厚的金电极形成漏电极以及 50 nm 厚的银电极形成源电极。电极的形状由掩模版 ($L=30 \mu\text{m}$, $W=1\ 000 \mu\text{m}$) 形成。

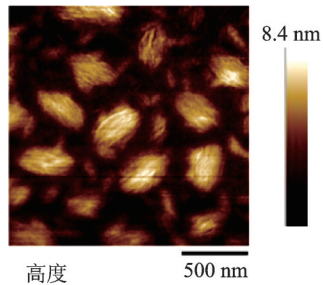
2 结果与讨论

2.1 基于肖特基势垒调控的有机突触晶体管的基本性能

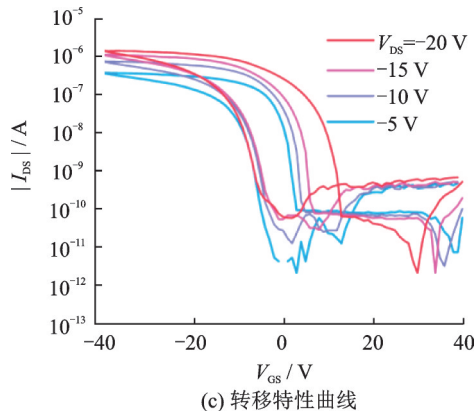
图 1(a) 显示, p/n 半导体异质结层作为有源层, 采用 p 型有机半导体材料 PDVT-10 是因为其本身具有高迁移率和良好的环境稳定性。此外, 其最高占据分子轨道能级 (HOMO 能级) 约为 -5.28 eV, 与金电极材料的功函数 5.1 eV 相近, 形成的是欧姆接触。同时与银电极材料的功函数为 4.26 eV 相远而形成肖特基接触。为了能够在半导体层中形成载流子的捕获位点, 选择的掺杂材料应该有与 PDVT-10 相差较大的能级, 文中 N2200 便符合该能级要求。如图 1(b) 所示, 通过原子力显微镜 (AFM) 对 p/n 半导体异质结构的形貌进行表征, 可以发现 N2200 分散在 PDVT-10 中, 这为器件提供了电子捕获位点。图 1(c) 为制备的基于肖特基势垒调控的有机突触晶体管的转移特性曲线, 曲线中存在表现突触行为所需的迟滞特性, 即记忆窗口。当施加正栅极电压时, 电子因 p/n 异质结构形成的能级差被捕获在离散的李 2200 中, 使得通道中多数载流子空穴数目占据优势。随着栅极电压的减小, N2200 中的电子诱导更多的空穴, 并使得器件在正向栅极电压下开启, 即转移曲线右移。同样的, 施加负栅极电压后, N2200 将捕获空穴与电子复合, 并排除部分电子, 这使得器件沟道中电子数目占据优势。随着



(a) 基于肖特基势垒调控的突触器件结构示意图



(b) 掺杂了20%N2200的PDVT-10的AFM图



(c) 转移特性曲线

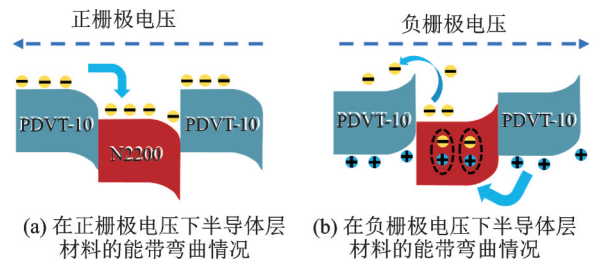
图1 基于肖特基势垒调控的有机突触晶体管器件结构示意图、半导体的微观图和器件的电学性能图

Fig.1 Schematic of organic synaptic transistor device structure based on Schottky barrier regulation, microscopic image of semiconductor, and electrical performance of the device

栅极电压减小, N2200中过量的空穴将诱导更多的电子, 并使器件在负栅极电压下就得到关态电流, 即转移曲线左移。

如图2(a)所示, 半导体层中N2200掺杂到PDVT-10中形成PDVT-10/N2200/PDVT-10的异质结构。当施加正向栅极电压时, 能带受到电场作用向下弯曲, p/n型半导体之间的能级差为使得N2200能够捕获并存储电子。因此, 若是此时移除栅极电压, 部分电子因异质结构的捕获不能立刻回到电流通道中, 而N2200中的电子也会在其附近诱

导出空穴, 从而得到比初始状态更高的通道电流。当施加负向栅极电压时, 如图2(b), 离散的N2200将存储空穴并与其内部的电子进行复合, 部分的电子将回到通道, 从而导致通道中的空穴浓度降低, 因此获得比初始状态更低的电流。以上特性使得器件能够表现出生物突触的行为。



(a) 在正栅极电压下半导体层材料的能带弯曲情况 (b) 在负栅极电压下半导体层材料的能带弯曲情况

图2 材料能带机理图

Fig.2 Energy band mechanism diagrams of materials

2.2 基于肖特基势垒调控的有机突触晶体管的突触性能测试

图3(a)为突触器件所模拟的生物结构。其中, 栅极施加电压类比突触前神经元接收外界信息产生膜电位的变化。前神经元的膜电位传递到突触前膜后, 将释放囊泡其中的神经递质。经过突触间隙达到突触后膜上的某个特定的受体, 此时, 突触后膜产生新的膜电位变化, 该电位变化可类比源漏电流的变化。因此, 可以通过简单的突触晶体管来模拟突触行为, 从而构架出所需要的神经形态计算网络。在图3(b)中, 通过施加不同的栅极脉冲(幅值为2~10 V, 脉冲宽度为180 ms, 源漏电压为-50 mV)来模拟突触最基础的行为——兴奋性突触后电流响应(Excitatory Post Synaptic Current, EPSC)。从图中可以看出, 施加的电压幅值越大, 所响应的源漏电流越高。这与生物上的突触行为相一致。其中, 脉冲电压为10 V时, 施加脉冲期间工作电流会因为电子被捕获到离散的N2200中, 同时排斥通道中的空穴, 从而减少。在撤去脉冲电压后, 聚集在N2200中的电子会诱导出多于初始状态的空穴, 因此EPSC (850 pA) 会比初始电流更高(720 pA)。为了更直观地观察电流的增强情况, 图3(b)的插图中省略了施加脉冲期间的工作电流。在这之后, 突触后电流会降低, 但最终的稳定电流仍比初始电流高。这表明突触器件进行了学习或记忆的行为。

生物大脑复杂的记忆和学习机制并不是单靠调节一个突触后电流就能实现的。神经元之间通常存在暂时的连接, 第一个神经活动留下暂时或持

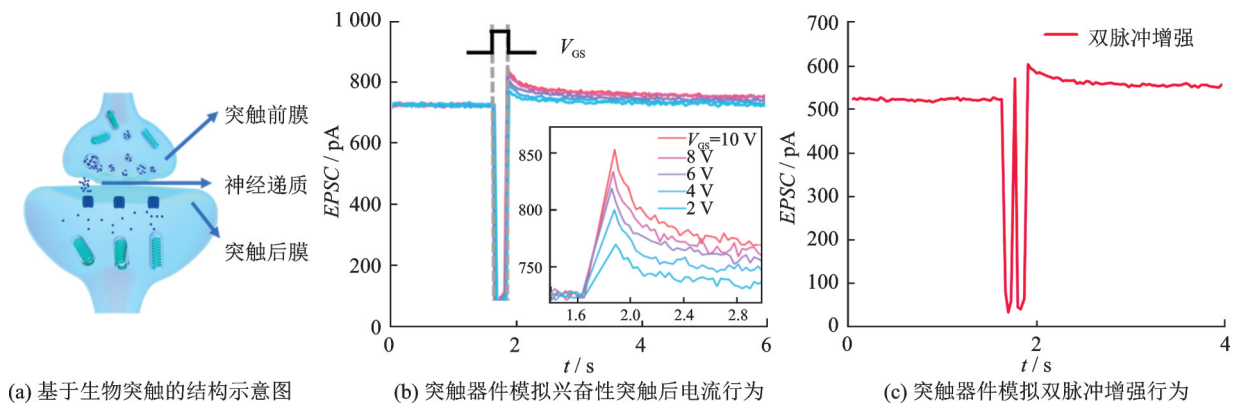


图 3 突触器件所模拟的生物结构示意图以及生物突触行为

Fig.3 Schematic of biological structure and synaptic behavior simulated by synaptic device

久的痕迹,使突触后膜对第二次刺激的反应更快。因此,单脉冲刺激向复杂双脉冲刺激的延伸使得生物突触在学习和记忆上具有可塑性,如短程可塑性(Short Term Plasticity, STP)和长程可塑性(Long Term Plasticity, LTP)。其中,STP的一个基础行为便是双脉冲增强(Paired Pulse Facilitation, PPF),该行为通常表现在突触被连续施加两个脉冲刺激的时候,第二个脉冲刺激产生的突触后电流将比第一个更高。因此,给突触器件连续施加两个栅极电压脉冲($V_{GS}=10\text{ V}$,脉冲宽度为 90 ms ,间隔为 30 ms , $V_{DS}=-50\text{ mV}$),以此来模拟生物上的PPF特性。在图3(c)中,突触器件表现出显著的PPF特性。从器件的结构分析,在第一个正向电压的作用下,N2200将捕获并存储部分电子。由于第二个正向电压间隔较近,N2200中将继续捕获和存储电子,这使得通道中的空穴浓度增大,并且沟道电

流也在第一个脉冲作用后的基础上继续增大,因此形成最终的峰值源漏电流高于前一个峰值源漏电流,并成功表现出PPF特性。

在生物上,突触所表现的学习和记忆来自于短程向长程的转变。因此,为了在器件上实现同样的由短程向长程的变化,分别施加了不同脉宽的栅极电压(10个 10 V 的脉冲,脉冲宽度为 $30\sim 150\text{ ms}$, $V_{DS}=-20\text{ mV}$)和不同数量的脉冲刺激(10 V ,脉冲宽度为 30 ms ,脉冲间隔为 30 ms , $V_{DS}=-50\text{ mV}$)来研究其中的电流变化。图4(a)中,突触器件在不同脉宽的作用下,最终的突触后电流逐渐增大,且最终的稳定电流均高于初始状态。图4(b)中,更多的脉冲数量将使得突触后电流提升到更高的水平。突触器件通过改变栅极脉冲的条件,实现从低电流水平向高电流水平的转变便是模拟生物上短程向长程可塑性转变的过程。

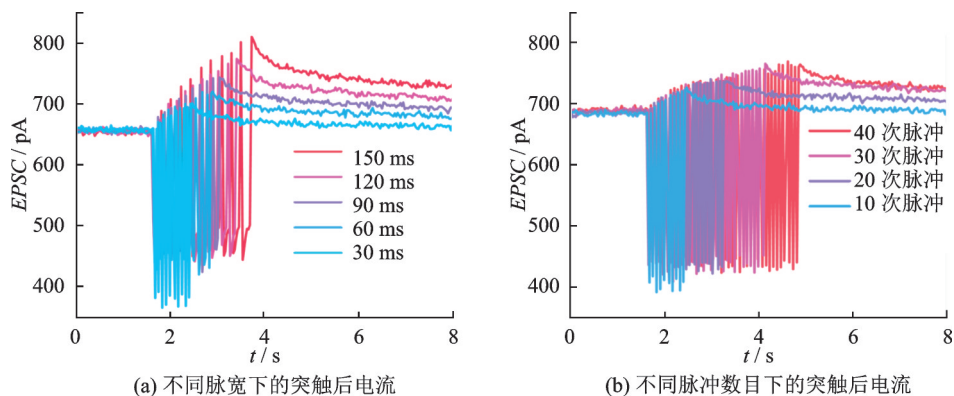


图 4 不同条件下(脉宽、脉冲数目)突触器件模拟生物短程向长程可塑性转变

Fig.4 Synaptic device simulation of short-term to long-term plasticity transition under different conditions (pulse width and pulse numbers)

2.3 基于肖特基势垒调控的低能耗有机突触晶体管

神经形态的突触装置正在经历一个快速发展的时代。有机突触晶体管器件的种类和应用不断

丰富,其功能性也在不断增加,甚至作为新型神经形态计算网络的基础元件。由于传统存储和计算系统尚未克服冯·诺依曼瓶颈,构建新型的低能耗、大规模并行和实时信息处理的神经形态计算网络

已经迫在眉睫。然而,现阶段多数的突触器件在工作时所消耗的能量(nJ)通常比生物突触消耗的能量(fJ)高出几个数量级。这必然会在模拟类脑神经网络时造成巨大的能量消耗。因此,设计一个结构简单且能够有效降低器件能耗的有机突触晶体管是非常必要的。

为了探索器件降低能耗的机理,在欧姆接触的传统突触结构中的源电极处引入了肖特基接触,即蒸镀源电极时使用银金属作为电极材料,其他制备的方法与传统欧姆接触结构保持一致。如图5所示,通过对传统欧姆接触器件以及肖特基接触器件的输出特性曲线进行对比,可以发现在源极处引入了肖特基接触的突触器件其电流水平和达到饱和电流的阈值电压明显更小。通过金属与半导体接触前后的能带变化来分析其中的原因。如图6(a)所示,金属的费米能级并不会因为与半导体的接触而改变其位置。在文中,p型半导体材料PDVT-10

的功函数为 -4.43 eV ,大于金属银的功函数(-4.26 eV)。在接触后,金属中的电子传输到半导体,或者说半导体中的空穴传输到金属中。这时,在p型半导体靠近表面的一侧,空穴减少而带负电。这些负电荷以电离受主杂质的形式分布靠近金属-半导体结区域一侧,其电场方向由金属指向半导体,并进一步升高半导体导带边沿。空穴不停地流入金属直到由半导体向金属扩散的空穴和电子逃离金属的速度趋于平衡,从而在靠近金属-半导体结的区域形成一个薄层,用于消耗可移动的载流子,这个薄层为耗尽区(Depletion Region),如图6(b)所示。与欧姆接触相比,肖特基器件中空穴需要额外克服肖特基势垒向低能级移动,或者说电极中的电子需要跨越该肖特基势垒才能进入半导体中与空穴复合,因此,基于肖特基接触的突触器件有着比欧姆接触器件更小的工作电流。为了对比两个器件之间的最低工作能耗,对器件施加单个栅极电压脉冲来观

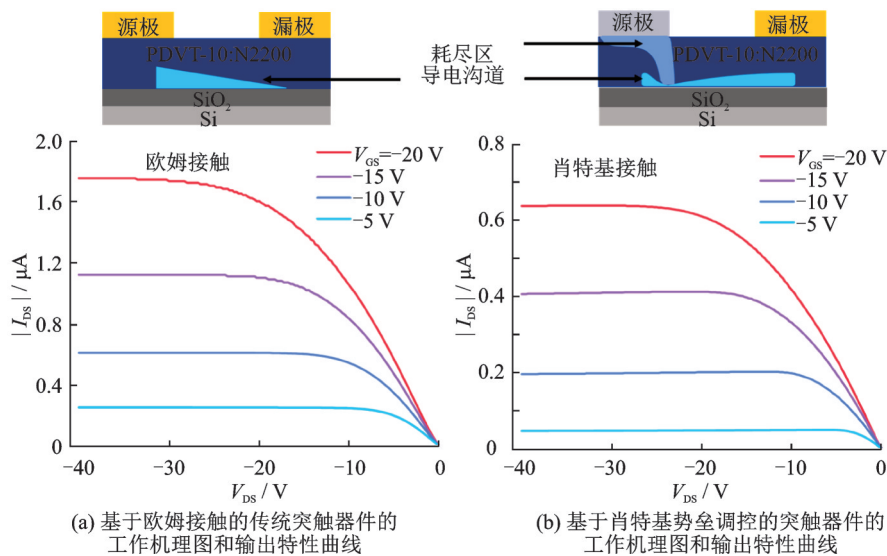


图5 基于不同接触下(欧姆接触、肖特基势垒调控)突触器件的工作示意图以及电学性能图

Fig.5 Schematic of the operation of synaptic devices based on different contacts (Ohmic contact and Schottky barrier regulation) and electrical performance graph

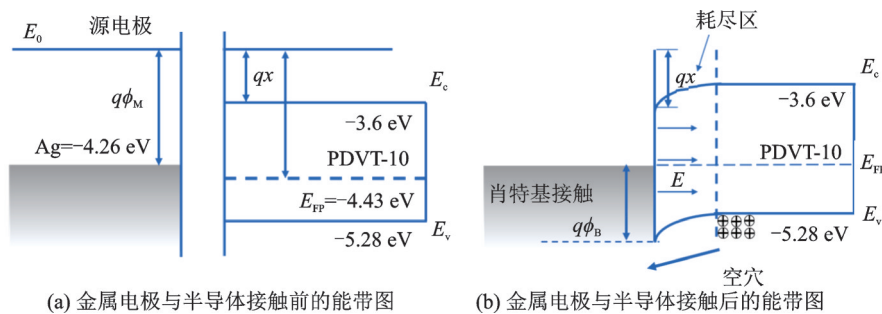


图6 在接触前后金属电极与半导体层的能带示意图

Fig.6 The band diagrams of metal electrodes and semiconductor layer before and after contact

察其突触后电流的响应,并以此计算器件在单个突触事件下工作所需要消耗的能量。

如图7(c)所示,当施加持续时间为30 ms的脉冲时,在引入肖特基势垒的情况下,其EPSC响应比传统欧姆接触器件的响应电流还低。这表明肖特基势垒可以有效地限制电子从电极向半导体层转移。其中,基于肖特基接触的器件其30 ms的响应电流为600 pA,工作电压 V_{DS} 为-40 mV。依据能耗计算公式^[12]: $E = I_{DS} \times V_{DS} \times t$,可得此时的能耗为 7.2×10^{-13} J,即720 fJ,这与生物突触的平均能耗量级一致。而基于欧姆接触的传统器件(图7(a))在30 ms的响应电流为1 075 pA,工作电压 V_{DS} 为-40 mV,此时的能耗为 12.9×10^{-13} J,即1 290 fJ。

这已经超越了通常突触的能耗范围。同样的,突触器件不仅需要表现出单个脉冲刺激下的响应电流,还需响应多个脉冲来实现长程可塑性,从而达到长期记忆的效果。如图7(b)和图7(d)所示,为了更直观地观察多个脉冲后电流相比初始状态的增量,图中省略了施加脉冲期间的电流变化情况,仅保留了脉冲施加前期和后期的电路变化。随着脉冲的数量从10增加到40(其中 $V_{DS} = -50$ mV,脉冲电压为10 V,脉冲持续时间为30 ms,间隔为30 ms),引入了肖特基势垒的突触器件其电流响应范围始终被限制在pA量级。相反,基于欧姆接触的传统突触器件其初始电流上升的范围大,工作能耗将会更高。

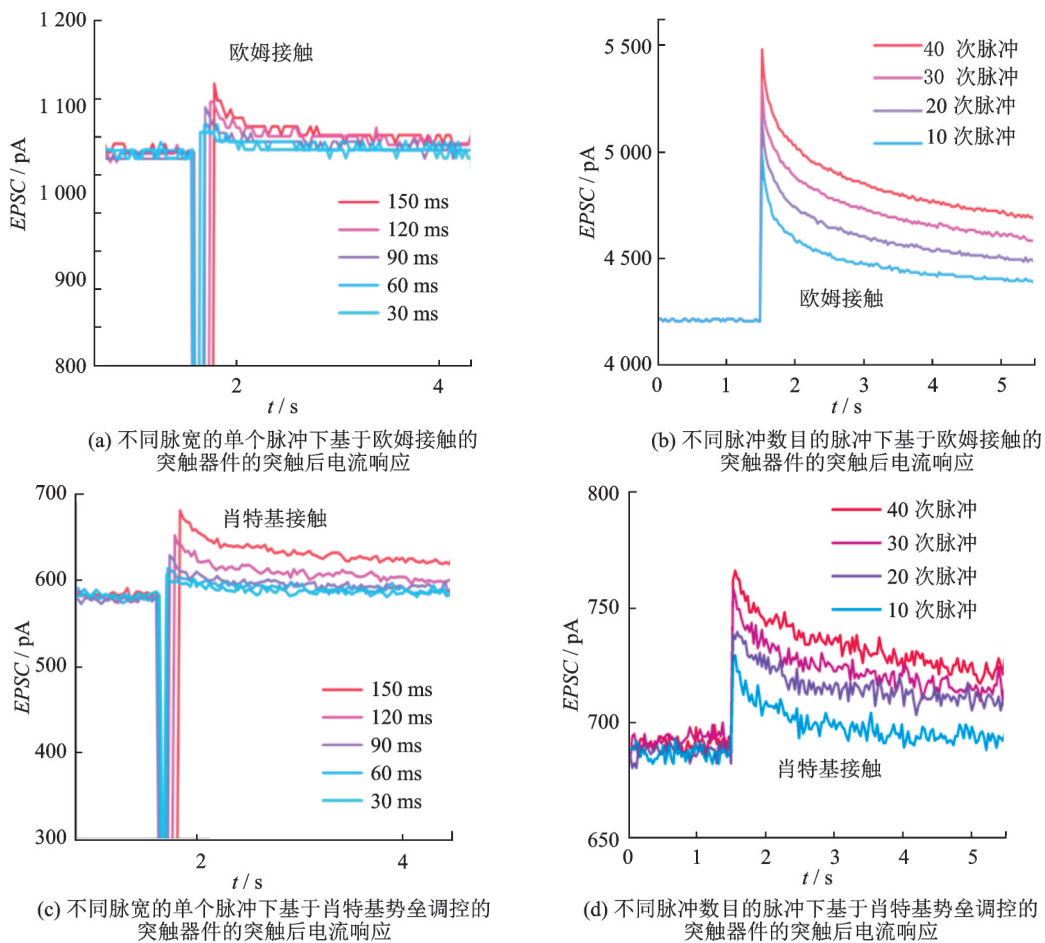


图7 在不同条件(脉宽、脉冲数目)的单脉冲刺激下基于欧姆接触与基于肖特基势垒调控的突触器件的电流响应对比图
Fig.7 Comparative current response graphs of synaptic devices based on Ohmic contact and Schottky barrier regulation under different conditions (pulse width and pulse numbers)

3 结 论

利用n型有机半导体材料N2200掺杂在p型有机半导体材料PDVT-10中形成捕获中心而能表现

出突触行为的特性,制备了以p/n半导体异质结为有源层的突触晶体管。同时,使用银金属作为源电极引入肖特基接触来优化基于欧姆接触的传统突

(下转第316页)