

文章编号:1001-9014(2004)03-0205-03

光子存储单元的光伏效应

卞松保, 李桂荣, 唐艳, 胡冰, 李月霞, 杨富华, 郑厚植

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:报道了光存储效应在一种特殊设计的光存储单元 I-V 特性上的响应. 当单元偏置在光存储模式下, 越过禁带的光激发会产生一个台阶状的电流阶跃. 利用瞬态光电流测试装置测量电流阶跃处的瞬态响应, 验证了“开→关”光电流下降沿主要反映了光照消失后原先被存储起来的电子、空穴的衰变过程. 其时间常数是光存储时间的一种度量, 而光照下所出现的台阶状电流阶跃则是光子存储效应在 I-V 特性的反映.

关键词:光子存储; 光伏效应; I-V 特性

中图分类号: O47 **文献标识码:** A

PHOTOVOLTAIC EFFECT IN A PHOTON STORAGE CELL

BIAN Song-Bao, LI Gui-Rong, TANG Yan, HU Bing,
LI Yue-Xia, YANG Fu-Hua, ZHENG Hou-Zhi

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The response of photonic memory effect in I-V characteristics of a specially designed photonic memory cell was reported. When the cell is biased in a storage mode, the optical excitation with the photon's energy larger than the energy gap gives rise to a step-like jump in the current. A set-up was used to measure the transient photocurrent at the biases where the step-like jump showed up. It is proved that the falling transient edge of the photocurrent, as the photoexcitation turns off, mainly maps the decaying of electrons and holes, which were previously stored in the cell during the illumination. Its time constant is a measure of photonic memory time.

Key words: photonic storage; photovoltaic effect; I-V curves

引言

经特殊设计的半导体低维结构在受到光激发时, 入射光子可先转变成空间分离的电子-空穴对被存储相当长的时间, 随后再通过施加相反偏压驱使所存储的电子和空穴复合放出光子, 完成光的读出. 利用这种效应有望研制出可动态随机存取的光子存储器^[1-3,8], 应用于全光计算机及光信号处理系统之中. 但是, 如何使读出光子频率与写入光子频率保持不变仍是一个有待解决的难题. 目前已经有许多工作采用光写入、光读出的方法^[2,8]验证了在各种不同的半导体光存储器件中的光子存储效应. 本文在一种量子阱-量子点复合结构的半导体光存储单元^[8]中首次报道了光子存储器的光伏响应, 并

且利用瞬态光电流测量方法, 验证了所观察到的瞬态光电流的时间响应正是由光子存储效应所致.

1 样品和实验

我们所用的器件结构是用分子束外延技术 (MBE) 生长在 (100) n^+ -GaAs 衬底上. 首先生长 $1\mu\text{m}$ 厚掺硅 (10^{18}cm^{-3}) GaAs 缓冲层, 然后按照下述顺序依次生长: 30nm 厚的非掺杂 GaAs 隔离层, 25nm 厚的 AlAs 势垒, 3nm 厚的 GaAs 隔层, 6nm 厚的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 窄量子阱, 45nm 厚的 GaAs 宽量子阱, 1.8ML 自组织 InAs 量子点层, 5nm 厚的 GaAs 隔层, 25nm 厚的 AlAs 势垒及 30nm 非掺杂 GaAs 隔离层, 最后再覆盖一层 30nm (掺硅 10^{18}cm^{-3}) GaAs 盖层, 其核心部分的带边结构如图 1 所示. 采用标准的

收稿日期: 2003-05-20, 修回日期: 2004-02-20

Received date: 2003-05-20, revised date: 2004-02-20

基金项目: 国家重点基础研究计划 (G001CB3095) 和国家高技术发展研究计划资助项目 (2002AA302104)

作者简介: 卞松保, 男 (1977-), 河南舞钢人, 中国科学院半导体研究所, 硕士研究生, 主要从事半导体光存储单元物理研究.

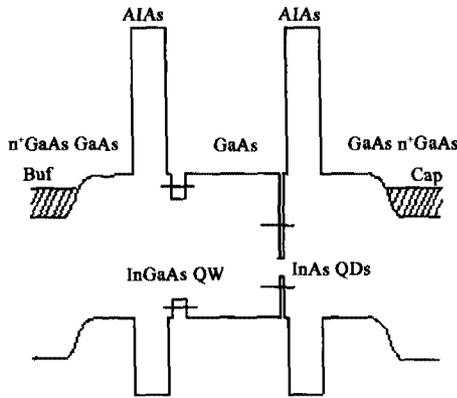


图1 带边能带结构示意图

Fig. 1 The schematic band edge profile

光刻工艺将基片刻蚀成长宽为 $660 \times 370 \mu\text{m}^2$ 的矩形台面,再利用光刻掩膜在样品表面蒸发 Au/Ge/Ni 并合金形成中间带有 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 方形光学窗口的矩形欧姆电极.在重掺杂衬底背面蒸 In 后合金形成下表面欧姆接触.

测量时将样品装在氦闭循环制冷器的冷头上,测量温度为 10K. 实验中分别用氩离子激光器的 488nm 线和掺钛蓝宝石激光器的 785nm, 850nm, 934nm 线为样品提供光照. I-V 特性用 Hewlett-Packard 4140B pA 计来测量,瞬态光电流曲线由 SR250 型 boxcar 积分器来测量.

2 结果和讨论

图 2 给出了 10K 下样品分别在 785nm, 850nm, 934nm 的 $500 \mu\text{W}$ 掺钛蓝宝石激光照射下和没有激光照射时的典型 I-V 特性. 当照射样品的激光能量高于 GaAs 禁带能量(785nm)、正(反)向偏压超过正(负)1V 后,样品出现 $5 \mu\text{A}$ 左右的阶跃型光电流

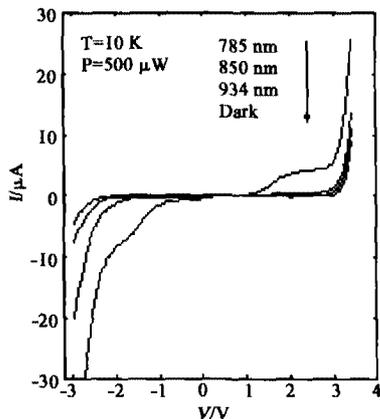


图2 在不同波长激光光照下的 I-V 特性

Fig. 2 I-V characteristics as functions of photoexcitation

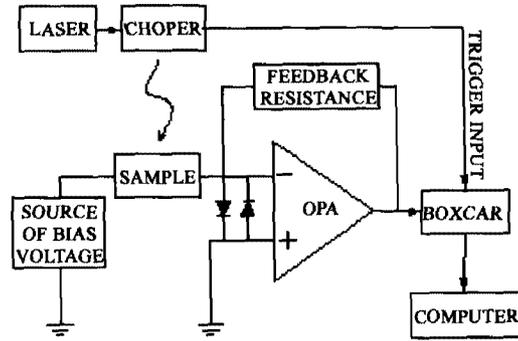


图3 瞬态光电流的测量装置

Fig. 3 Measurement set-up for transient photocurrent

响应.但是,当用 850nm (1.46eV), 934nm (1.33eV) 激光照射时, I-V 特性没有出现上述阶跃型的光电流响应. 上述实验现象使我们推判在 I-V 特性上所观察到的电流阶跃现象是由于复合结构有源区中出现了光子存储效应所造成的结果. GaAs 中央阱中由高于 GaAs 禁带的光子 ($\hbar\omega > 1.516\text{eV}$) 所产生的电子和空穴,在外加偏压驱动下分别存储在两侧的量子阱和量子点中,这种空间分离的电子与空穴所形成的内建电场,将部分屏蔽 GaAs 阱中的外加电场,这将使有源区上的电势在 AlAs 垒和 GaAs 阱之间发生重新分配. 结果是 GaAs 阱上的压降下降,有源区其余区域的压降升高,以维持样品两端的压降不变. 这实际上是一种发生在 GaAs 阱中的内光伏效应. GaAs 阱两侧的 AlAs 垒上的偏压增大,必然会导致通过整个结构隧穿电流的增加,故出现所观察到的电流阶跃现象. 当用光子能量小于 GaAs 跃迁能量 1.516eV 的 850nm, 934nm 激光照射样品时, GaAs 阱中不发生由光子存储效应引起的光伏效应,因此也就观察不到明显的电流阶跃现象.

为了进一步验证我们提出的物理机制,我们测

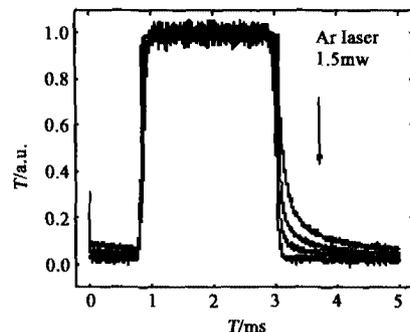


图4 光电流瞬态谱. 箭头所指方向偏压依次为: 2.8V, 2.5V, 2.2V, 1.7V

Fig. 4 Transient photocurrent spectra. The biases are 2.8V, 2.5V, 2.2V, 1.7V from the top down

量电流阶跃的时间响应特性. 为此设计了一套测量瞬态光电流的装置, 如图 3 所示. 将样品偏置在大于 $\pm 1\text{V}$ 的固定偏压下, 激光束通过光斩波器再照射到样品上, 然后测量光电流随脉冲光照的瞬态响应. 为了保证运算放大器有足够快的时间响应, 选用了增益带宽为 20MHz 的 LF357A 的放大器, 实测放大器自身的时间响应快于 $1\mu\text{s}$. 图 4 给出了样品在经 238Hz 斩波后的 488nm Ar^+ 激光 (输出功率 1.5mw) 照射下测到的不同偏压下的光电流瞬态响应. 为了便于比较, 对图中电流幅度进行了归一. 上升沿代表样品从无光照到有光照时的电流瞬态响应, 主要反映电子空穴在电场作用下沿相反方向漂移和最终各自被陷落所需的时间. 这是相当快的瞬态过程, 实验测到的上升沿主要受测试装置自身响应 ($\sim 1\mu\text{s}$) 的限制. 下降沿代表从有光照向无光照转变时, 原先存储在 GaAs 阱两侧的电子、空穴通过各种辐射、非辐射过程逐渐复合消失的过程, 这是我们感兴趣的特性. 如图 4 所示, 当偏压小于或等于 1.7V 时, 也即没有进入图 2 所示的电流阶跃区域时, 没有呈现明显的时间衰变过程. 当偏压升至 2.2V 时, 开始出现明显的衰变过程. 并且, 随偏压继续增大到 $2.5\text{V}, 2.7\text{V}$, 衰变过程变得更加明显. 对样品归一化的光电响应取自然对数, 可以发现, “开 \rightarrow 关”的电流下降沿不服从简单的指数关系. 但是, 大体上仍可分成一个初始的快衰变过程和一个长时间的慢衰变过程. 对上述两个区域进行线性回归拟合, 分别得到两组指数衰减的时间常数. 其中, 快衰变过程对应的时间常数 τ_1 在偏压为 $2.2\text{V}, 2.5\text{V}, 2.8\text{V}$ 下依次为 $0.063\text{ms}, 0.072\text{ms}, 0.102\text{ms}$. 而慢衰变过程对应的时间常数 τ_2 在偏压为 $2.2\text{V}, 2.5\text{V}, 2.8\text{V}$ 下依次为 $2.393\text{ms}, 1.969\text{ms}, 1.825\text{ms}$.

我们着重讨论“开 \rightarrow 关”电流下降沿的行为. 在激发光功率恒定的条件下, 从延迟时间可调的光读出测量^[8] 我们已经发现当偏压小于 1.7V 时, 光激发的电子、空穴不能很好地在空间上被分离开来, 因此它们也就不能很有效地分别存储在 GaAs 阱两侧的 InGaAs 阱和 InAs 量子点上. 随偏压增加至 $2.2\text{V}, 2.5\text{V}, 2.8\text{V}$, 被存储起来的电子、空穴数量增多, 它们的复合衰变对光电流下降沿起的作用越来越明显. 我们同样发现当激光功率由 1.5mw 降至 1.0mw , 在相同的偏置条件下, 被存储起来的电子、空穴总量随之减小, 上述慢衰变过程对“开 \rightarrow 关”光电流下降沿的影响也随之减少. 因此, 图 4 所示的慢衰变过程确实反映了光存储器中所存储的电子、空穴

的衰变特性. 由指数拟合得出的时间常数 τ , 反映了电子、空穴在光存储器中的存储时间特性. 在理想情况下, 不同偏压下 ($2.2\text{V}, 2.5\text{V}, 2.8\text{V}$) 测得的时间常数 τ 应当大致一样, 只取决于无光照以后空间分离的电子、空穴的衰变速率. 实测的 τ 值随偏压增加略有减少, 分别为 $2.393\text{ms}, 1.969\text{ms}$ 和 1.825ms . 这可能是因为随偏压增大, 通过 AlAs 垒的隧穿逃逸速率增大所致. 至于“开 \rightarrow 关”初始的快衰变过程, 很可能是由于稳态光激发撤掉后, 没有被存储起来的少部分电子、空穴或者是被复合掉, 或者是被存储起来, 如此引起整个结构空间电荷的瞬态调整. 与前者相比, 它应当是比较快的过程, 实测结果小于 0.1ms , 它对存储时间的影响很小.

3 结论

我们在量子阱—量子点复合结构光存储单元中首次报道了光子存储的光伏响应. 光激发产生的电子、空穴在电场驱使下分别存储在 GaAs 阱两侧的 InGaAs 阱和 InAs 量子点部位, 它们所形成的内建电场将部分屏蔽 GaAs 阱中的外加电场, 增大了两侧两个 AlAs 势垒上的压降, 使得通过整个结构在大于 $\pm 1\text{V}$ 处的隧穿电流在光照下出现台阶型的阶跃响应. 利用瞬态光电流测试装置, 测量了出现电流阶跃处的瞬态响应, 验证了“开 \rightarrow 关”光电流下降沿主要反映了光照消失后, 原先被存储起来的电子、空穴的衰变过程. 因此, 其时间常数是光存储时间的一种度量, 而光照下所出现的台阶状电流阶跃则是光子存储效应在 $I-V$ 特性上的反映.

REFERENCES

- [1] Zimmermann S, Wixforth A, Kotthaus J P, *et al.* A Semiconductor-based photonic memory cell [J]. *Science*, 1999, **283**: 1292—1295.
- [2] Lundstrom T, Schoenfeld W, Lee H, *et al.* Exciton storage in semiconductor self-assembled quantum dots [J]. *Science*, 1999, **286**: 2312—2314.
- [3] Roche C, Zimmermann S, Wixforth A, *et al.* Acoustically driven storage of light in a quantum well [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**: 4099—4102.
- [4] Schoenfeld W V, Lundstrom T, Petroff P M, *et al.* Charge separation in coupled InAs quantum dots and strain-induced quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 2194—2196.
- [5] BIAN Song-Bao, TANG Yan, LI Gui-Rong, *et al.* Photon-storage in optical memory cells based on a semiconductor quantum dots-quantum well hybrid structure [J]. *Chinese Phys. Lett.*, 2003, **20**: 1362—1365.