

ВОЗБУЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОПЛАЗМ — ПИЧКОВЫХ АВТОСОЛИТОНОВ В КРЕМНИЕВЫХ $p-i-n$ -СТРУКТУРАХ

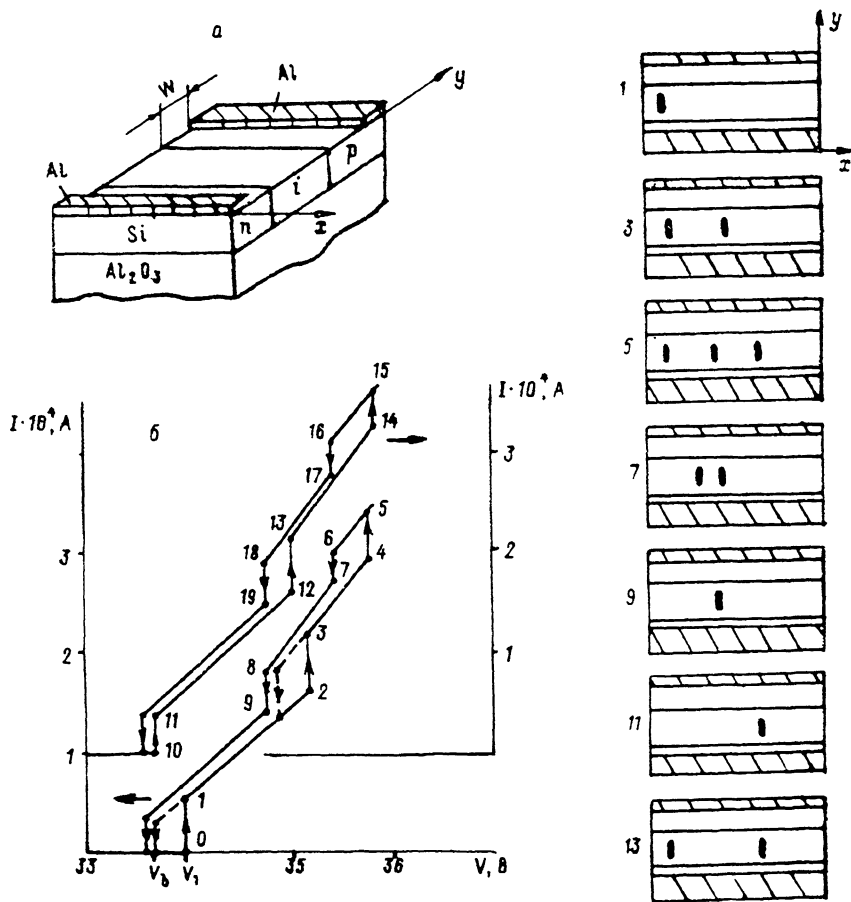
Ващенко В. А., Кернер Б. С., Осипов В. В., Синкевич В. Ф.

Экспериментально изучены микроплазмы, возникающие в специально изготовленных планарных $p-i-n$ -структурах на основе тонкой пленки кремния на сапфировой подложке. Показано, что микроплазмы в виде тонких светящихся нитей можно возбуждать в произвольном месте структуры локализованным импульсом света. В отсутствие импульса света микроплазмы возникают в месте расположения неоднородностей, играющих роль зародышей микроплазм. Образование и исчезновение новых микроплазм сопровождаются многочисленными участками гистерезиса на ВАХ структуры. Наблюдаемая сложная картина эволюции микроплазм объяснена на основе общих свойств пичковых автосолиитонов.

При лавинном пробое $p-n$ -переходов, как правило, наблюдаются микроплазмы в виде светящихся точек размерами \sim мкм [1]. Принято считать, что микроплазмы образуются благодаря малым неоднородностям в области пространственного заряда $p-n$ -перехода. Однако на основе этого простого соображения нельзя объяснить многие свойства микроплазм, а прежде всего гистерезис, проявляющийся при возникновении и исчезновении микроплазм. В только что вышедшей работе [2] предложен механизм образования микроплазм в $p-i-n$ -структуре и теоретически изучены их свойства. Образование микроплазм связывается с возрастающей зависимостью скорости ударной ионизации от концентрации неравновесных носителей в i -области структуры и растеканием тока по квазинейтральным n - и p -областям. Согласно [2], микроплазмы являются одним из наиболее ярко выраженных примеров реализации пичковых автосолиитонов, т. е. сильно неравновесных областей, которые можно возбудить в различного рода слабо неравновесных системах [3]. Иными словами, микроплазмы должны обладать теми же свойствами, что и пичковые автосолиитоны [3]. В частности, в [2] показано, что микроплазме можно возбудить в идеально однородной по площади $p-i-n$ -структуре, а неоднородности являются лишь зародышами спонтанного образования микроплазм, параметры которых слабо зависят от параметров самих неоднородностей. Наличие же участков гистерезиса на вольт-амперной характеристике (ВАХ) $p-i-n$ -структуры может быть связано с конечной областью устойчивого существования состояния в виде данного количества микроплазм в образце.

Для сопоставления выводов из теории микроплазм [2] с экспериментально наблюдаемыми их свойствами была специально изготовлена планарная $p-i-n$ -структура на основе тонкой пленки кремния толщиной 0.5 мкм с концентрацией доноров $\sim 10^{14}$ см⁻³, выращенной на диэлектрической подложке из сапфира. Сильно легированные p - и n -области ($p \sim 10^{18}$ см⁻³, $n \sim 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³) изготавливались по стандартной технологии ионным легированием бора и фосфора, а электроды — напылением алюминия (см. рисунок. а). Длина более высокоомной p -области (по сравнению с n -областью) составляла 15 мкм, а ширина $W \approx 3-4$ мкм (см. рисунок, а). Исследования показали, что при напряжениях $V > V_b$ (на рисунке, б $V = V_1 \approx 34$ В), при которых коэффициент лавинного умножения $M \approx 30-60$, в $p-i-n$ -структуре спонтанно возникает микроплазма в виде наблюдаемой в микроскопе светящейся нити размером ~ 1 мкм. Ее обра-

зовании сопровождается скачком тока (скачок $0 \rightarrow I$ на рисунке, б, левая ось ординат), по величине которого можно оценить плотность тока, а следовательно, и коэффициент умножения в микроплазме. По оценкам, значение M_{\max} в микроплазме составляет величину $\sim 10^9 - 10^{10}$, т. е. совпадает со значением M_{\max} , полученным в численных расчетах [2]. Во многих структурах при повторении эксперимента образование микроплазмы происходило случайно в различных, но, как правило, фиксированных точках. При этом пороговое значение напряжения



Схематическое изображение исследуемой планарной кремниевой $p-i-n$ -структуры (а) и вид одной из типичных ВАХ (б).

Справа изображены наблюдаемые в микроскоп качественные картинки расположения микроплазм в виде нескольких светящихся нитей. Номер картинки соответствует точке на ВАХ, обозначенной тем же номером. На б верхняя кривая соответствует ВАХ образца при возбуждении первой микроплазмы He-Ne-лазером в области структуры, где отсутствует неоднородность (11 справа); для нее значения тока приведены на правой оси ординат. Стрелками показаны соответствующие увеличения или уменьшения тока при скачкообразном образовании новых микроплазм в образце. Штриховые линии — участки ВАХ, отвечающие уменьшению напряжения от точки 3, в которой образуются две микроплазмы (значение тока в точке 0 равно $5.5 \cdot 10^{-8}$ А, а в точке 10 — $4 \cdot 10^{-8}$ А).

$V = V_b$, величина скачка тока, при котором микроплазма исчезает (скачок тока при $V = V_b$ на рисунке, б), слабо зависят от того, в каком месте располагалась микроплазма.

Экспериментально обнаружено, что при напряжениях $V > V_b$, но $V < V_1$ (см. рисунок, б) микроплазму можно возбудить вынужденно в произвольном месте структуры. Для этого $p-i-n$ -структура кратковременно освещалась в различных точках i -области сфокусированным в пятно размером ~ 4 мкм лучом света He-Ne-лазера мощностью ~ 1 мВт (длина волны 0.63 мкм). Такое вынужденное образование микроплазмы также сопровождалось скачком тока (скачок $10 \rightarrow 11$ на рисунке, б, правая ось ординат), величина которого примерно совпадала со скачком тока при спонтанном образовании микроплазм (скачок $0 \rightarrow I$ на рисунке, б, левая ось ординат), и практически не зависело от

места возбуждения микроплазмы. Было установлено, что при понижении напряжения микроплазма исчезает при некотором критическом значении $V \approx V_b$, величина которого слабо зависит от места расположения микроплазмы. Таким образом, было установлено, что параметры микроплазмы — ее размер, плотность тока и область существования (величина критического напряжения V_b) — не зависят от предыстории образования микроплазмы и слабо зависят от параметров неоднородности, спровоцировавшей спонтанное образование микроплазмы.

Картина эволюции микроплазм при изменении напряжения на структуре имеет весьма сложный вид (см. рисунок, б) и качественно не зависит от того, вынужденно или спонтанно произошло образование первой микроплазмы. С ростом напряжения увеличивается интенсивность свечения микроплазм, а при некоторых значениях напряжения число микроплазм скачкообразно увеличивается (скачки $2 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 5$ или $12 \rightarrow 13$, $14 \rightarrow 15$ на рисунке, б). С ростом тока число микроплазм увеличивается, а их распределение [вдоль оси x (см. рисунок, а)] все более напоминает периодическое. При этом минимально наблюдаемое расстояние между микроплазмами всегда превышало 3 мкм, т. е. ширину (W) p -области структуры (см. рисунок, а). Этот результат также согласуется с выводами работы [2].

При уменьшении напряжения интенсивность свечения каждой микроплазмы падает пропорционально току. При некоторых напряжениях число микроплазм в образце скачкообразно уменьшается (скачки $6 \rightarrow 7$, $8 \rightarrow 9$ или $16 \rightarrow 17$, $18 \rightarrow 19$ на рисунке, б). При уменьшении числа микроплазм в образце интенсивность свечения оставшихся микроплазм скачкообразно возрастает. Эти выводы также согласуются с результатами численных исследований модели микроплазм, предложенной в [2]. При дальнейшем уменьшении напряжения в p - i - n -структуре происходит образование сначала двух, а затем и одиночной микроплазм.

При уменьшении напряжения микроплазмы могут образовываться в совершенно иных местах, чем при увеличении напряжения (ср. 1 с 9 и 3 с 7 на рисунке справа). Вследствие этого при напряжениях $V > V_b$ вид ВАХ зависит не только от количества, но и от расположения микроплазм в образце, т. е. от предыстории их образования. Вид ВАХ зависит также и от того, в какой последовательности происходят увеличение и уменьшение напряжения на образце (см. рисунок, б).

Таким образом, полученные в данной работе экспериментальные результаты согласуются с выводами развитой в [2] теории микроплазм и подтверждают тот факт, что микроплазмы по своим свойствам действительно совпадают с пикковыми автосолитонами [3].

Список литературы

- [1] Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. Л., 1980. 152 с.
- [2] Графийчук В. В., Дацко Б. И., Кернер Б. С., Осипов В. В. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 4. С. 724—730.
- [3] Кернер Б. С., Осипов В. В. // УФН. 1989. Т. 157. В. 2. С. 201—266.

Научно-производственное объединение «Орион»
Москва

Получена 13.02.1990
Принята к печати 19.04.1990