

Переключение лавинных S -диодов в сильноточном режиме

И.А. Прудаев¹, В.В. Копьев¹, В.Л. Олейник¹, Ю.С. Петрова¹, А.С. Сотникова^{1,2}, С.М. Гуцин²

¹Томский государственный университет

²АО «НИИПП»»

Аннотация: В работе рассмотрены особенности переключения лавинных S -диодов в сильноточном режиме при генерации наносекундных токовых импульсов с амплитудой от 15 до 150 А. Представлены частотные зависимости напряжения переключения и остаточного напряжения в сильноточном режиме. Показано, что максимальные частоты генерации, превышение которых приводит к резкому снижению эффективности (но не катастрофическому разрушению приборного кристалла) достигают 10-500 кГц. В этом случае максимальная частота растет при уменьшении напряжения переключения S -диода с 650 до 150 В. Причины снижения напряжения переключения и эффективности коммутации с ростом частоты генерации токовых импульсов анализируются с использованием численных методов.

Ключевые слова: импульсные диоды, лавинный пробой, арсенид галлия, ионизирующие домены

1. Введение

Лавинный S -диод – это замыкающий ключ, работающий в режиме генерации ионизирующих коллапсирующих доменов (collapsing field domain - CFD) [1-4]. Вольт-амперная характеристика этого прибора имеет S -образный вид [1, 5]. При подаче порогового напряжения (100-1000 В) S -диод переходит в открытое состояние за время, составляющее порядка 0.1-1 нс за счет формирования токового шнура с плотностью, превышающей 1-10 МА/см². Сочетание высокой скорости переключения и высокого порогового напряжения позволяют использовать данный ключ в схемах накачки полупроводниковых лазеров для лидаров и дальномеров (продемонстрирована генерация оптических импульсов с амплитудой до 135-160 Вт и длительностью 1.1 нс для чип-лазеров с эффективностью 2.8-3.1 Вт/А [2, 4]).

Ранее было показано [4], что динамика переключения S -диода в сильноточном режиме является сложной: после быстрой начальной стадии включения наблюдается колебательный переходной процесс с длительностью порядка 2-3 нс. При этом начальная стадия включения имеет длительность порядка 200-250 пс, а переключение на начальной стадии происходит до напряжения $0.32 \cdot V_S$, где V_S – блокирующее напряжение переключения S -диода [4]. Относительно большое остаточное напряжение должно ограничивать ток через S -диод в открытом состоянии и приводить к снижению его эффективности (росту коммутационных потерь). В настоящей работе экспериментально исследуются частотные зависимости остаточного напряжения и напряжение переключения S -диодов в сильноточном режиме. Обнаружено, что увеличение толщины активной области S -диода в некотором диапазоне приводят к увеличению напряжения переключения и снижению остаточного напряжения.

2. Образцы и эксперимент

Лавинные S -диоды, выбранные для исследования представляли собой n^+ - π - n^0 - n^+ (подложка)-структуры, π -область которых получена компенсацией n -GaAs глубоким акцептором Fe. Толщины n^+ и n^0 -слоев составляли $d_{n^+} = 6$ мкм и $d_{n^0} = 10$ -12 мкм. Толщина π -слоя менялась для разных структур от 6 до 25 мкм. Площадь контактов

диодов составляла 1.5 мм^2 . Подробное описание типичной S -диодной структуры представлено в [4]. Схема коммутации лавинного S -диода представлена на рисунке 1. В рабочем режиме на S -диод подается напряжение со скоростью $dV/dt \approx 10^{10} \text{ В/с}$ (положительная полярность на подложке). При достижении порогового напряжения на π - n^0 -переходе начинается лавинный пробой в локальной области. Резкое падение сопротивления π - n^0 -перехода приводит к двусторонней инжекции носителей в π -область зарождающегося токового шнура (лавинных дырок из π - n^0 -перехода и электронов из n^+ - π -перехода). При достижении критической плотности тока запускается механизм CFD, приводящий к переключению структуры в проводящее состояние [2-4].

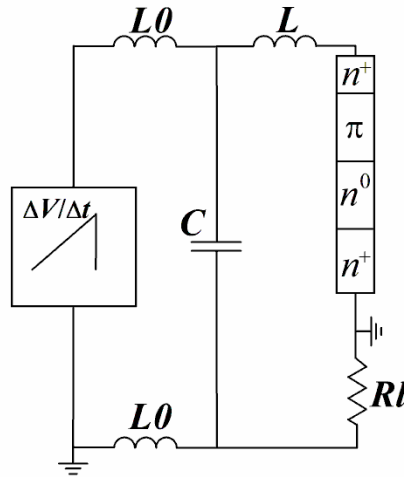


Рисунок 1. Схема переключения лавинного S -диода. $L0 = 200 \text{ нГн}$ – индуктивность источника питания (внутреннее сопротивление источника - 100 Ом), $C = 200 \text{ пФ}$ – накопительная емкость, $L = 1.3 \text{ нГн}$ – паразитная индуктивность, $RI = 1 \text{ Ом}$ – сопротивление нагрузки.

В эксперименте измерялись зависимости напряжения на S -диоде при различных частотах следования запускающих импульсов (0.1 - 500 кГц) с использованием осциллографа с полосой пропускания 8 ГГц . Кроме этого проводились измерения амплитуды токовых импульсов в схеме накачки полупроводникового лазера. В этом случае в качестве нагрузки использовались коммерчески доступные чип-лазеры с максимальной эффективностью 3.6 Вт/А (в линейной области, до 10 А). Сила импульсного тока определялась из паспортной ватт-амперной характеристики лазерных диодов по измеренной оптической мощности (см. пояснения к рисунку 3).

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты измерения напряжения на S -диоде во время переключения при низких частотах следования импульсов (менее 1 кГц). Остаточное напряжение (как характеристику коммутационных потерь) можно отождествлять с минимальным напряжением после первой стадии переключения (для различных кривых на рисунке 2 оно составляет: 6 мкВ – 56 В , 25 мкВ – 148 В). На вставке рисунка 2 представлены средние значения, измеренные по 3-6 образцам из каждой партии. В пределах одной партии S -диодов всегда присутствует значительный разброс напряжения переключения (V_S) относительно среднего V_{SA} и остаточного напряжения V_R . При этом V_R и V_S не коррелируют между собой и их относительное изменение по партии составляет $\Delta V_S/V_{SA} \approx 0.1$ и $V_R/V_S \approx 0.25$ - 0.7 . Причины такого разброса могут быть связаны с различием в параметрах каналов переключения – токовых шнуров.

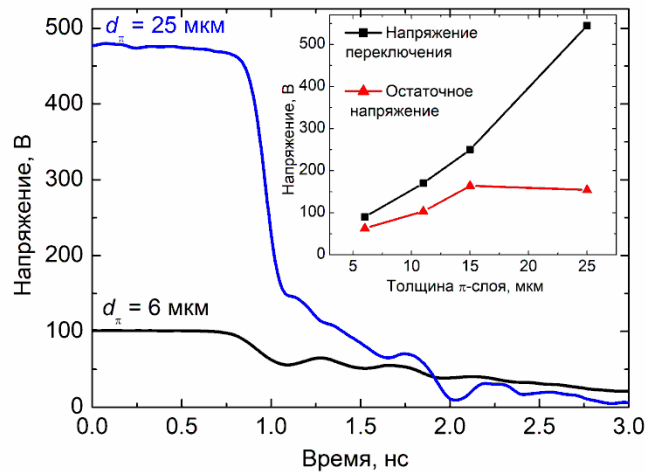


Рисунок 2. Зависимости напряжения на S -диоде от времени при переключении для двух образцов с различной толщиной π -слоя. На вставке представлена зависимость напряжения переключения и остаточного напряжения от толщины π -слоя (средние значения для четырех партий диодов).

Зависимость напряжения переключения от толщины π -слоя близка к линейной, четырехкратное увеличение d_π приводит к увеличению напряжения переключения приблизительно в 5 раз (вставка рисунка 2). Согласно полученным данным, наиболее эффективно переключаются структуры с максимальной толщиной π -слоя (при увеличении d_π с 15 до 25 мкм остаточное напряжение снижается). Резкий рост эффективности подтверждается результатами измерения импульсного тока в схеме генерации оптических импульсов (рисунок 3). Из рисунка 3 видно, что сила тока при увеличении напряжения переключения в 4 раза, увеличивается приблизительно на порядок (с 15 до 142 А в данном случае).

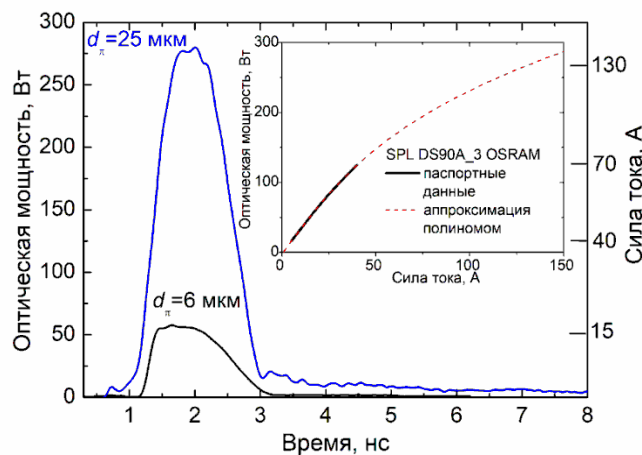


Рисунок 3. Зависимости оптической мощности изученного импульса в схеме накачки полупроводникового лазера SPL DS90A_3 (правая шкала является нелинейной, она получена пересчетом из ватт-амперной характеристики). На вставке представлена ватт-амперная характеристика лазера (паспортные данные до 125 А, при больших мощностях для оценки силы тока использовался полином).

На рисунке 4 представлены частотные зависимости напряжения переключения и остаточного напряжения для двух S -диодов с толщиной π -слоя 6 и 25 мкм. Зависимости получены при активном воздушном охлаждении S -диодов. Без охлаждения напряжение переключения S -диодов резко снижается на высоких частотах, так что максимальные частоты генерации уменьшаются в 2-3 раза. Уменьшение толщины активной области приводит к росту максимальной частоты.

Независимо от толщины активной области для подавляющего большинства диодов эффективность имеет максимум в области средних частот, после чего резко снижается. Для образцов с $d_n = 6$ мкм наиболее эффективная коммутация наблюдается в области 50-100 кГц, для образцов с $d_n = 25$ мкм частоты эффективной коммутации снижаются до 1-3 кГц.

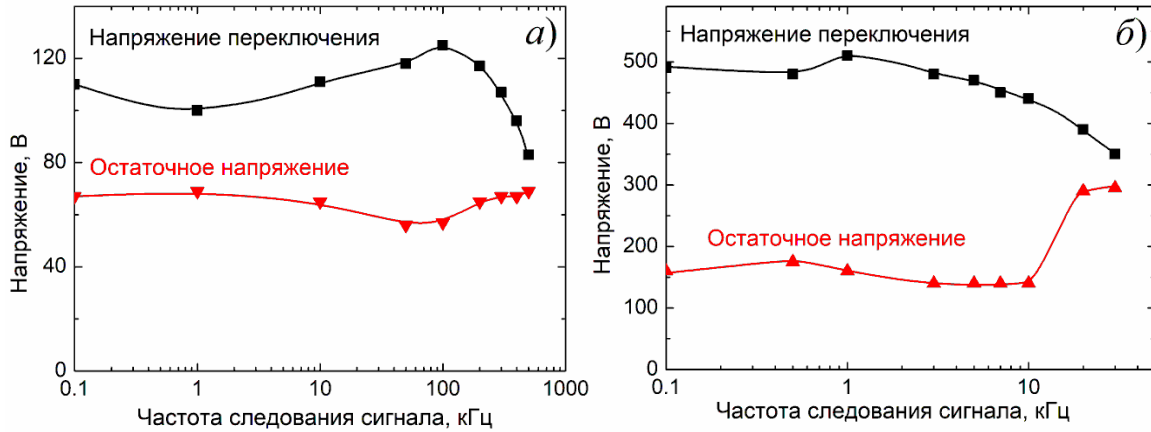


Рисунок 4. Частотные зависимости напряжения переключения и остаточного напряжения для S -диодов с толщиной p -слоя 6 мкм (а) и 25 мкм (б).

Отметим, что измерение частотных зависимостей для высоковольтных S -диодов осложняется недостаточной электрической прочностью используемых конденсаторов в схеме генерации (С, рисунок 1). Использование тонкопленочных конденсаторов при напряжениях более 350-450 В практически исключено, в то время, как керамические (сегнетоэлектрические) плоскопараллельные конденсаторы не способны быстро отдавать запасенный заряд в нагрузку (на данный факт ранее также указывалось в работе [6]). При этом ряд проведенных экспериментов показал, что при импульсных токах менее 20-25 А (длительность импульсов порядка 1 нс) вполне допустимо использовать плоскопараллельные конденсаторы из сегнетоэлектрика (отличий от результатов, полученных с использованием тонкопленочных конденсаторов не замечено). Из-за имеющегося технологического разброса для конденсаторов в ряде случаев удастся повысить напряжение на тонкопленочных образцах свыше 450 В (максимальное значение составляло порядка 650 В при импульсном токе ≈ 150 А, однако время работы конденсаторов сильно ограничено).

Максимум в частотной зависимости напряжения переключения можно объяснить конечным временем перезарядки глубокой примеси в активной области S -диода и локальным перегревом, вызванным высокой плотностью тока в проводящих каналах. Расчеты, проведенные с использованием TCAD, показали, что после переключения на месте токового шнура образуется область n -типа проводимости, концентрация электронов в которой относительно медленно уменьшается со временем (рисунок 5). Уменьшение связано с захватом электронов на глубокие акцепторные центры железа. При использовании в расчете сечения захвата электронов $3 \cdot 10^{-20}$ см² время перехода в равновесное состояние превышает 1 мс, а инверсия типа проводимости наступает спустя приблизительно 100 мкс (рисунок 5). При высоких частотах в структуре не успевает сформироваться p -слой с повышенным сопротивлением. По этой причине напряжение V_s снижается, так как ток перед переключением становится выше (переключение инициируется инжектированными с n^+ -контакта электронами, лавинный пробой запускается при меньшей напряженности электрического поля). Локальный перегрев, вероятно, приводит к уменьшению коэффициентов ударной ионизации и снижению концентрации лавинных носителей (остаточное напряжение может расти по этой причине).

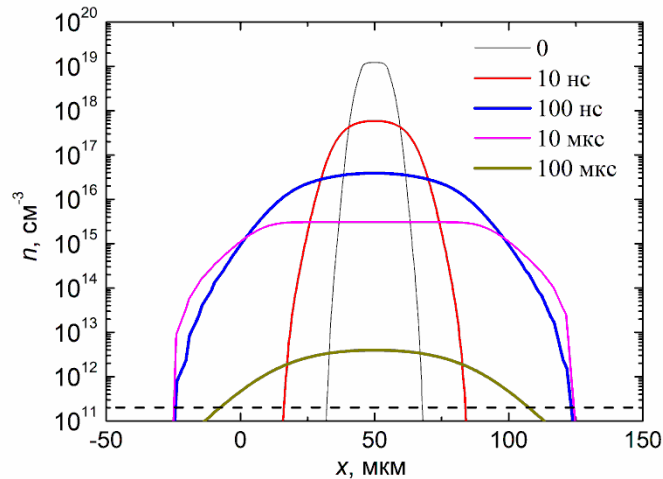


Рисунок 5. Рассчитанные профили концентрации неравновесных свободных электронов по сечению токового шнура в области π -слоя для различного интервала времени после переключения S -диода (направление x нормально к направлению протекания тока, центр токового шнура соответствует $x = 50$ мкм). Горизонтальная пунктирная линия обозначает концентрацию равновесных дырок в π -слое.

3. Заключение

- 1) Спад напряжения переключения S -диодов V_S при увеличении частоты может быть связан с перезарядкой глубокой примеси Fe: на высоких частотах S -диод не успевает восстановить высокое сопротивление активной области из-за медленного захвата неравновесных электронов из зоны проводимости.
- 2) Рост остаточного напряжения S -диодов V_R при увеличении частоты может быть объяснен снижением коэффициентов ударной ионизации при локальном перегреве GaAs, что должно приводить к уменьшению концентрации лавинных носителей в формирующемся токовом шнуре.
- 3) В сильноточном режиме относительное остаточное напряжение V_R/V_S является нелинейной функцией толщины активной области S -диода. Увеличение толщины в диапазоне 15-25 мкм приводит к резкому снижению V_R/V_S (увеличению эффективности коммутации). Причины этого эффекта не установлены и требуют дальнейшего исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00053).

Список литературы

1. Prudaev I. A. et al. The mechanism of superfast switching of avalanche S-diodes based on GaAs doped with Cr and Fe // IEEE Trans. Electron Devices. – 2018. – Т. 65. – № 8. – С. 3339.
2. Prudaev I. A. et al. Avalanche delay and dynamic triggering in GaAs based S-diodes doped with deep level impurity // IEEE Trans. Electron Devices. – 2021. – Т. 68. – № 1. – С. 57.
3. Prudaev I. A. et al. Suppression of Dynamic Current Leakage in Avalanche S-Diode Switching Circuits // IEEE Electron Device Lett.. – 2022. – Т. 43. – № 1. – С. 100.
4. S. Vainshtein S. et al. The Physical mechanism underpinning superfast switching of GaAs S-diodes // Solid State Commun. – 2023. – Т. 365. – С. 115111.
5. Prudaev I. et al. Microplasma Breakdown in GaAs-Based Avalanche S-Diodes Doped with Deep Fe Acceptors // Phys. Status Solidi B. – 2023. – Т. 260. – С. 2200446.
6. S. Vainshtein S. et al. Miniature High-Power Nanosecond Laser Diode Transmitters Using the Simplest Possible Avalanche Drivers // IEEE Trans. Power Electronics – 2019. – Т. 34. – № 4. – С. 3689.