07

Влияние температуры на напряжение переключения лавинных *S*-диодов

© *И.А. Прудаев*[1], *В.В. Копьев*[1], *В.Л. Олейник*[1], *М.С. Скакунов*[1], *А.С. Сотникова*[1,2], *С.М. Гущин*[2], *В.Е. Земляков*[3]

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
[2] Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, Томск, Россия
[3] Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Зеленоград, Москва, Россия
E-mail: funcelab@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 сентября 2024 г.
В окончательной редакции 21 октября 2024 г.
Принято к публикации 22 октября 2024 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния температуры на напряжение переключения лавинного *S*-диода, изготовленного из GaAs с примесью железа. Установлено, что рост температуры может приводить к снижению напряжения переключения при высокой частоте коммутации (500 kHz). Для анализа эффекта проведено моделирование двукратного переключения *S*-диода. Обнаружено два различных режима его работы на высокой частоте следования импульсов.

Ключевые слова: лавинный пробой, глубокие центры, арсенид галлия, силовая электроника, импульсная техника.

DOI: 10.21883/0000000000

Лавинный *S*-диод — это полупроводниковый замыкающий ключ из GaAs, работающий на эффекте коллапсирующих доменов [1–3]. Структура *S*-диода подобна структуре лавинного биполярного транзистора [3]. Основные его отличия заключаются в том, что базовая область в *S*-диоде получается компенсацией *n*-GaAs глубоким акцептором (железом), она имеет большие удельное сопротивление (порядка $10^5\,\Omega\cdot$cm) и толщину (более $10\,\mu$m). Данный ключ эффективно используется для генерации коротких импульсов тока в схемах накачки полупроводниковых лазеров [3]. По соотношению $I/\Delta t$ (I — сила тока, Δt — длительность импульса тока) *S*-диод конкурирует с другими приборами: полевыми транзисторами из GaN [4,5], тиристорами из GaAs [6] и лавинными биполярными транзисторами из Si [7]. Среди перечисленных приборов *S*-диод является наиболее высоковольтным, что обусловливает характерную для него проблему — саморазогрев при коммутации на частотах в десятки-сотни kHz. В работе [3] показано, что при повышении частоты от 10 до 250 kHz амплитуда токовых импульсов падает в 3 раза. Эффект не получил детального объяснения, но связывался с ростом температуры. В настоящей работе исследуются причины данного негативного эффекта, обнаружено снижение напряжения переключения *S*-диода с ростом температуры при коммутации на высокой частоте, предложено объяснение.

В работе исследованы *S*-диоды из партии с напряжением переключения 150–180 V. *S*-диод представлял собой $n^+-\pi-n^0-n^+$(подложка)-структуру, π-область которой получена компенсацией *n*-GaAs глубоким акцептором (железом). Компенсация проводилась в процессе диффузии в исходную эпитаксиальную структуру $n^+-n^--n-n^+$-типа (рис. 1, *a*). Толщины слоев составляли $d_{n^+} = 6\,\mu$m, $d_\pi = 11\,\mu$m, $d_{n^0} = 11\,\mu$m (подробное описание приводится в [3]). Схема коммутации *S*-диода и его структура представлены на рис. 1, *b*. В рабочем режиме на *S*-диод подается напряжение со скоростью $\Delta V/\Delta t \approx 10^{10}$ V/s (положительная полярность на подложке). При достижении необходимых условий *S*-диод переключается в открытое состояние [2,3].

Напряжение на *S*-диоде измерялось в точке 1*S* при помощи высокоомного зонда с полосой пропускания 200 MHz. Измерение амплитуды токовых импульсов проводилось в схеме накачки полупроводникового лазера аналогично работе [2]. В этом случае в качестве нагрузки использовались коммерчески доступные чип-лазеры с максимальной эффективностью 3.6 W/A (в линейной области, до 10 A). Сила импульсного тока определялась на основе ватт-амперной характеристики лазерных диодов по измеренной оптической мощности. В эксперименте цепь $SD-C-LD-L$ монтировалась на массивное основание из алюминия с активным воздушным охлаждением (использовался микровентилятор с потребляемой мощностью менее 0.5 W). При этом *S*-диод крепился к основанию при помощи тепло- и токопроводящего клея через контакт к n^+-слою. При измерении электрических параметров на фиксированной частоте коммутации (500 kHz) проводились измерения температуры основания (T_M). Для этого использовался датчик температуры, расположенный на расстоянии 3 mm от *S*-диода. Изменения температуры добивались за счет регулировки тока питания микровентилятора. Электрические характеристики измерялись при стационарном значении T_M.

Результаты измерений представлены на рис. 2. Отметим два эффекта, сопровождающие рост температуры

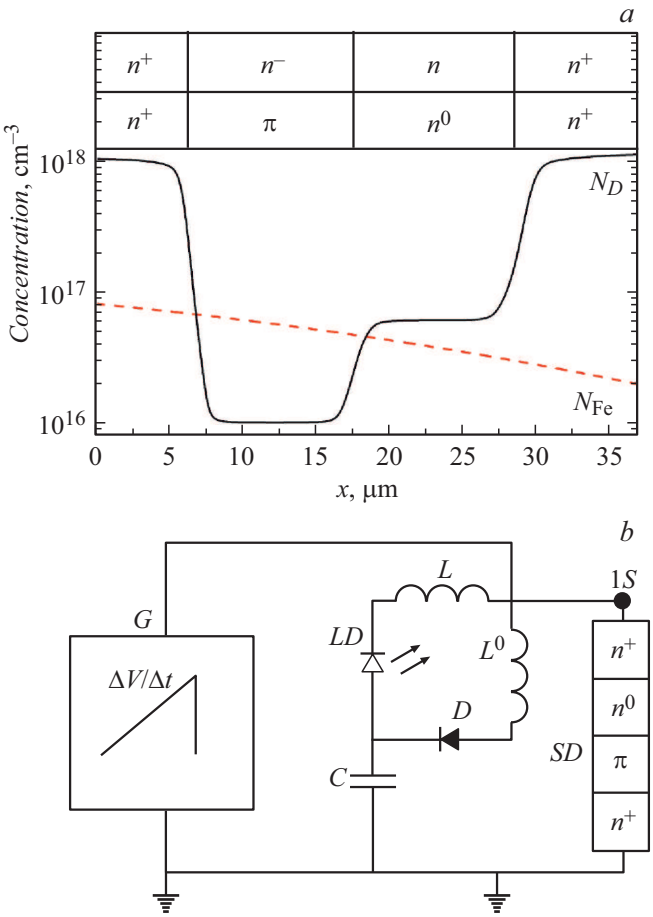

Рис. 1. *a* — профили распределения мелкого донора (N_D) и глубокого акцептора (N_{Fe}) в структуре. Вверху представлено схематическое изображение $n^+-n^--n-n^+$- и $n^+-\pi-n^0-n^+$-структур. *b* — экспериментальная схема включения *S*-диода. *G* — генератор запускающих импульсов, *SD* — *S*-диод, *C* — конденсатор (200 pF), *LD* — лазерный диод, *D* — выпрямляющий диод, L^0 — индуктивность 15 nH, *L* — паразитная индуктивность 1 nH.

T_M. Во-первых, изменяется напряжение переключения (V_S): наблюдается слабый рост от 112 до 123 V, затем резкий спад до 86 V. Во-вторых, эффективность переключения резко снижается при снижении напряжения переключения: сила тока уменьшается в 3 раза. Заметим, что точное значение температуры *S*-диода (T) неизвестно, и о росте T можно судить лишь косвенно (по измеренным значениям температуры T_M).

Эффект снижения V_S с ростом температуры T описан в справочной литературе [8], однако его объяснение не представлено. Данный эффект выглядит аномальным, так как переключение инициируется лавинным пробоем [2,3], напряжение которого, как правило, увеличивается с ростом температуры. Для объяснения эффекта в настоящей работе проведено моделирование переключения *S*-диода в TCAD Sentaurus по методике, представленной в работе [2]. Использовалась гидродинамическая модель, описанная в [9]. При моделировании *S*-диод запускался двумя импульсами напряжения с интервалом 2 μs. В данном подходе предполагалось, что амплитуда второго импульса на *S*-диоде соответствовала напряжению переключения *S*-диода при частоте 500 kHz. При этом полевая и температурная зависимости коэффициентов ударной ионизации для электронов и дырок учитывались аналогично работе [9].

Результаты моделирования представлены на рис. 3. Видно, что температурная зависимость V_S имеет излом: слабый рост напряжения сменяется резким спадом при $T = 320-330$ K, после чего V_S снова слабо увеличивается при росте T. При уменьшении V_S с 200 до 89 V амплитуда импульса тока уменьшается в 2.7 раза. Анализ профилей напряженности поля показал, что до точки излома лавинный пробой перед переключением происходит в *n*-области, а после точки излома — на границе n^--n-перехода (вставки на рис. 3, *a*). При этом во время увеличения напряжения на *S*-диоде не происходит изменения концентрации захваченного на ловушки заряда. Для объяснения

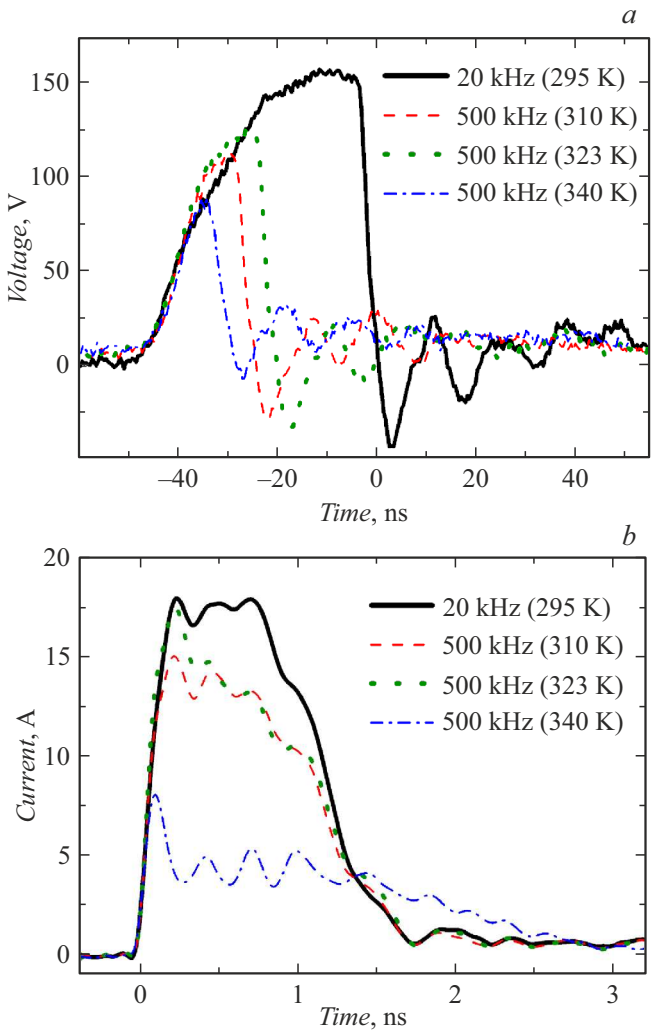

Рис. 2. Экспериментальные зависимости напряжения на *S*-диоде (*a*) и силы тока через *S*-диод (*b*) при различных температурах основания T_M для двух частот следования импульсов.

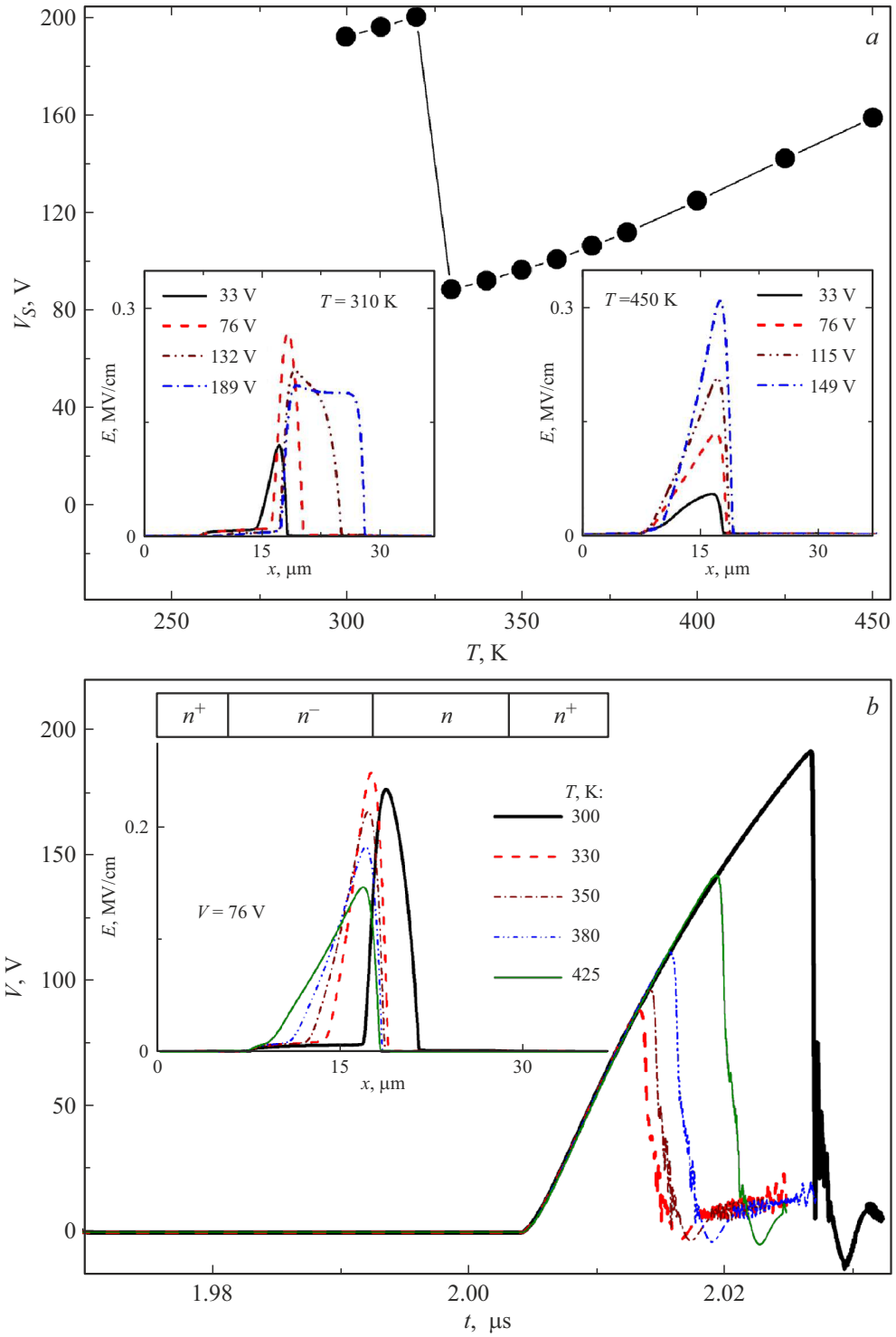

Рис. 3. Рассчитанная температурная зависимость напряжения переключения (*a*) и эпюры напряжения на *S*-диоде при различных температурах (*b*). На вставках (фрагмент *a*) показаны рассчитанные профили напряженности электрического поля для различных поданных напряжений при двух температурах, на вставке (фрагмент *b*) приведены профили напряженности электрического поля при фиксированном напряжении 76 V.

двух режимов переключения была рассмотрена динамика заполнения центров железа в интервале времени между первым и вторым запускающими импульсами напряжения.

Было установлено, что после первого включения *S*-диода формируется электронно-дырочная плазма с концентрацией $10^{18}-10^{19}\,\mathrm{cm}^{-3}$. Затем происходит захват дырок на отрицательно заряженные центры железа,

они становятся нейтральными. Электроны захватываются нейтральными центрами железа гораздо медленнее, так как сечение их захвата мало. Вследствие этого второе переключение (через 2μs) происходит не в $n^+-\pi-n^0-n^+$-структуре, а в $n^+-n^--n-n^+$-структуре. Данный факт обосновывает подход, в котором двукратное переключение моделируется в пределах одной области. Если в структуре после первого включения возникает область с пониженным напряжением переключения ($n^+-n^--n-n^+$-структура), то именно в ней будет происходить формирование токового шнура при втором запуске S-диода. Действительно, в эксперименте всегда напряжение переключения при первом запуске выше, чем напряжение переключения при втором.

Уровень компенсации в n^-- и n-областях зависит от температуры: чем выше T, тем ближе распределение заряда к равновесному при фиксированном времени. При комнатной температуре во время второго переключения S-диода сопротивление n^--n-перехода оказывается мало, и поданное напряжение прикладывается к n-области (левая вставка на рис. 3, a). Данный эффект связан с инжекцией электронов с n^+-n^--перехода: для экранирования положительного заряда ионов в n-области требуется задавать бóльшую плотность тока, чем в n^--области. При $T \geq 330$ K сопротивление n^--n-перехода оказывается достаточно высоким, чтобы приложенное напряжение привело к его лавинному пробою (правая вставка на рис. 3, a). Таким образом, рост температуры вызывает рост сопротивления n^--n-перехода. Наибольшее сопротивление достигается, когда структура возвращается к равновесному состоянию и становится $n^+-\pi-n^0-n^+$-структурой (в этом случае концентрация свободных носителей определяется аналитически по формулам из работы [10]). Дополнительные расчеты показали, что температура перехода от одного режима к другому чувствительна к значениям выбранных сечений захвата электронов и дырок. В данной работе представлены результаты для значений $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{cm}^{-3}$ и $\sigma_p = 1.5 \cdot 10^{-16}\,\mathrm{cm}^{-3}$.

Эффект динамической компенсации, описанный выше, также оказывает влияние на рост V_S при увеличении T. На вставке к рис. 3, b показано, что рост температуры ведет к увеличению напряжения на n^--области и снижению максимальной напряженности электрического поля на n^--n-переходе. Таким образом, в лавинном S-диоде рост напряжения лавинного пробоя связан не только с температурной зависимостью коэффициентов ударной ионизации, но и с изменением сопротивления вследствие ионизации глубоких центров.

Представленный анализ дает качественное описание эффекта снижения V_S с ростом температуры и позволяет обосновать необходимость охлаждения S-диода при высоких частотах коммутации. На практике необходимо не допускать превышения некоторой критической температуры, иначе S-диод переходит скачком в режим неэффективной генерации токовых импульсов. Точный расчет температурной зависимости напряжения переключения S-диода требует знаний о температурных и полевых зависимостях сечений захвата носителей заряда на глубокие центры, а также о концентрации заряженных центров в областях формирования токовых шнуров.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-00053.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, M.M. Kulagina, H.T. Moilanen, IEEE Trans. Electron Dev., **57** (4), 733 (2010). DOI: 10.1109/TED.2010.2041281
[2] I.A. Prudaev, S.N. Vainshtein, M.G. Verkholetov, V.L. Oleinik, V.V. Kopyev, IEEE Trans. Electron Dev., **68** (1), 57 (2021). DOI: 10.1109/TED.2020.3039213
[3] S. Vainshtein, I. Prudaev, G. Duan, T. Rahkonen, Solid State Commun., **365**, 115111 (2023). DOI: 10.1016/j.ssc.2023.115111
[4] A. Liero, A. Klehr, A. Knigge, W. Heinrich, Eng. Res. Express, **2** (1), 015023 (2020). DOI: 10.1088/2631-8695/ab5be5
[5] J. Glaser, IEEE Power Electron. Mag., **4** (1), 25 (2017). DOI: 10.1109/MPEL.2016.2643099
[6] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, В.А. Крючков, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, А.Е. Гришин, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков, Письма в ЖТФ, **50** (4), 43 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57101.19771 [S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, V.A. Krychkov, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, V.N. Svetogorov, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, Tech. Phys. Lett., **50** (2), 81 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.02.57993.19771].
[7] S. Vainshtein, G. Duan, T. Rahkonen, Z. Taylor, V. Zemlyakov, V. Egorkin, O. Smolyanskaya, T. Skotnicki, W. Knap, Results Phys., **19**, 103509 (2020). DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103509
[8] Б.А. Наливайко, А.С. Берлин, В.Г. Божков, В.В. Вейц, Г.П. Гермогенова, Л.С. Либерман, Г.Л. Приходько, Л.Ф. Сарафанова, А.К. Шухостанов, *Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды* (РАСКО, Томск, 1992), с. 75–77.
[9] I.A. Prudaev, V.V. Kopyev, V.L. Oleinik, V.E. Zemlyakov, IEEE Trans. Electron Dev., **71** (10), 5831 (2024). DOI: 10.1109/TED.2024.3438675
[10] Дж. Блекмор, *Статистика электронов в полупроводниках* (Мир, М., 1964), с. 140.