

13.4

Полупроводниковые плазменные антенны, формируемые лазерным излучением

© Н.Н. Богачев¹⁻³, Н.Г. Гусейн-заде^{1,3}, И.В. Жлуктова¹, С.Ю. Казанцев^{1,¶}, В.А. Камынин¹, С.В. Подлесных¹, В.Е. Рогалин⁴, А.И. Трикшев¹, С.А. Филатова¹, В.Б. Цветков^{1,5}, Д.В. Шохрин²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

⁴ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

¶ E-mail: s-kazantsev@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 августа 2019 г.

В окончательной редакции 15 августа 2019 г.

Принято к публикации 9 сентября 2019 г.

Экспериментально исследована эффективность передачи высокочастотных сигналов полупроводниковой передающей антенной из монокристаллов Ge и Si, на поверхности которой неравновесная электронно-дырочная плазма формируется излучением лазерного диода. Получены зависимости амплитуды излучаемого СВЧ-сигнала в диапазоне 6–7.5 GHz от мощности лазера и размера облучаемого участка на полупроводниковой передающей вибраторной антенне. Показано, что эффективность передачи полезного сигнала при формировании плазменной антенны в кристаллах Ge может быть увеличена более чем на порядок.

Ключевые слова: плазменная антенна, электронно-дырочная плазма, полупроводник, кремний, германий, лазерное излучение, СВЧ-излучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48793.18015n

В последнее время интенсивно изучаются возможности применения плазменных антенн в различных радио- и телекоммуникационных устройствах [1,2]. Основные преимущества и достоинства таких антенн были рассмотрены в работах [3,4]. Обычно в качестве альтернативы волноведущим элементам антенн используется газоразрядная плазма, в частности получаемая при пробое газовых промежутков в условиях пониженного давления [5–8]. В настоящей работе для этой задачи рассмотрена неравновесная электронно-дырочная плазма, создаваемая при воздействии лазерного импульса на полупроводник. Оказалось, что это более удобный инструмент для управления электромагнитными свойствами объектов, чем газоразрядная плазма. Это обусловлено несколькими причинами: меньшие энергозатраты на образование свободных носителей заряда (~ 1 eV в полупроводнике и ~ 30 eV в газоразрядной плазме); возможность получения плазмы со значительно более высокой концентрацией носителей заряда (10^{16} см⁻³ и выше [9]); отсутствие вакуумированных компонентов; компактность и удобство использования.

В работе экспериментально показана возможность использования в качестве вибраторной антенны электронно-дырочной плазмы, возникающей на поверхности полупроводника при воздействии лазерным излучением за счет внутреннего фотоэффекта. Эксперименты выполнялись на установке, показанной на рис. 1. Излучение от лазерного источника 1 проходит через коллиматор и с помощью цилиндрической линзы 2 фокусируется на

тонкую пластину из полупроводника (антенну). В результате на поверхности полупроводника формируется прямоугольное пятно шириной 1 mm и длиной 18 mm. Полупроводниковая пластина 4 посредством омического контакта 5 припаивалась к разьему коаксиального кабеля, на который подавался модулированный с частотой $\nu = 1$ kHz сигнал с СВЧ-генератора Г4-82 (6). Модуляция осуществлялась с помощью генератора прямоугольных импульсов 7. В процессе экспериментов несущая частота генератора 6 варьировалась в диапазоне 6–7.5 GHz с целью получения максимального сигнала на приемном устройстве 8, в качестве которого использовался детекторный приемник на базе диода ДК-В7М. Меняя диафрагму 3 и перемещая лазерный источник 1, можно варьировать как размеры облучаемой зоны на полупроводнике 4, так и ее положение относительно омического контакта. В качестве материала для пластин 4 использовались монокристаллы Ge с различным удельным сопротивлением и типом проводимости, а также монокристаллы высокочистого Si. Эксперименты выполнялись с использованием в качестве непрерывного источника излучения 1 лазерного диода K976FA2RN-20.00W фирмы BWT Beijing с волоконным выводом излучения ($\lambda = 975$ nm). Методика экспериментов заключалась в сравнении зарегистрированного приемником сигнала, переданного с помощью полупроводниковой антенны, и сигнала, переданного созданной с помощью оптически инициированной в полупроводнике электронно-дырочной плазмы (плазменной антенны). Для этого сначала (при

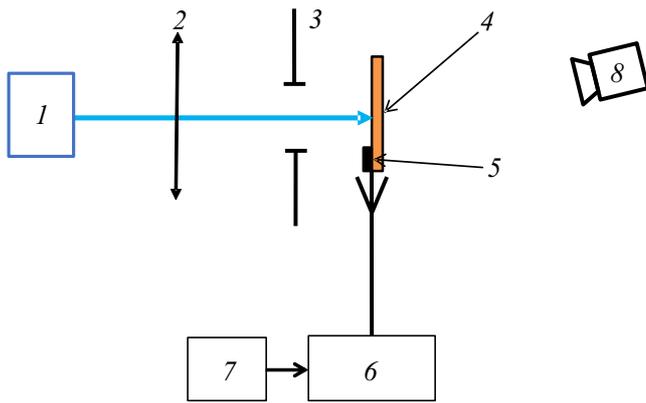


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0.9\text{--}1.1\ \mu\text{m}$; 2 — цилиндрическая линза, с помощью которой на полупроводнике формируется полоска длиной $L = 18\ \text{mm}$; 3 — подвижная диафрагма, за счет которой можно управлять размером области, облучаемой лазером; 4 — тонкая пластина из полупроводника; 5 — омический контакт на полупроводниковой пластине; 6 — СВЧ-генератор несущей частоты (Г4-82); 7 — задающий генератор; 8 — детекторный приемник на базе диода ДК-В7М.

выключенном лазере) на вибраторную полупроводниковую антенну с СВЧ-генератора подавался сигнал максимальной мощности, а расстояние до детекторного приемника выдерживалось максимальным, при котором еще сохранялась возможность уверенного (устойчивого) приема сигнала с генератора. После этого при данном зафиксированном расстоянии до детекторного приемника оптимизировалась передающая частота, т.е. частота СВЧ-генератора подстраивалась таким образом, чтобы получить максимальную амплитуду сигнала на приемнике. При лазерном воздействии на поверхности полупроводника образуется неравновесная электронно-дырочная плазма, которая приводит к росту передаточных характеристик полупроводниковой антенны. В дальнейшем проводился сравнительный анализ сигналов на детекторе, полученных при облучении полупроводника лазерным излучением и без облучения. Установлено, что облучение как Si-антенны, так и Ge-антенны лазерным диодом с длиной волны $\lambda = 975\ \text{nm}$ увеличивает их поверхностную проводимость, что повышает эффективность антенны и соответственно сказывается на увеличении регистрируемого сигнала на приемном детекторе. Наибольший рост амплитуды принимаемого сигнала с увеличением интенсивности лазерного облучения наблюдался на антеннах из Ge. Эксперименты проводились как для необлученной полупроводниковой антенны, так и при облучении ее лазерным диодом вблизи омического контакта. Область засветки — прямоугольная зона размером $1 \times 18\ \text{mm}$ — начиналась непосредственно на омическом контакте, как показано на рис. 1. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы

сигналов, зарегистрированные на приемном детекторе, в случае, когда в качестве антенны выступала прямоугольная пластина размером $5 \times 45\ \text{mm}$ и толщиной $1\ \text{mm}$ из монокристалла Ge марки ГМО (удельное сопротивление $47\ \Omega \cdot \text{cm}$). Видно, что электронно-дырочная плазма, возникающая в области засветки пластины Ge, проявляла себя как вибраторная плазменная антенна. При этом эффективность передачи сигнала существенно возрастает. Увеличение мощности лазерного излучения, воздействующего на полупроводник, приводит к росту эффективности антенны. Из рис. 3 видно, что при освещении Ge лазерным излучением $P_{las} = 3.5\ \text{W}$ амплитуда сигнала на детекторе (A_{las}) возрастает в 10 раз по сравнению с амплитудой исходного сигнала (A_0). Уменьшение размеров пятна облучения приводит к уменьшению длины плазменной части антенны; таким образом, вся антенна формируется из частей с различной проводимостью. Это реализуется как посредством смещения пятна облучения от омического контакта, так и путем уменьшения размеров облученной зоны с помощью диафрагмы. В этом случае происходит незначительное снижение эффективности плазменной антенны.

При использовании примесных полупроводников, уже являющихся из-за более высокой проводимости достаточно хорошими антеннами, облучение кристалла фактически лишь снижает активные потери в передатчике за счет увеличения проводимости антенны. При использовании антенн на основе, например, *p*-Ge с удельным сопротивлением $\leq 5\ \Omega \cdot \text{cm}$ величина относительного изменения амплитуды сигнала зависела только от общей проводимости, т.е. от количества лазерной энергии,

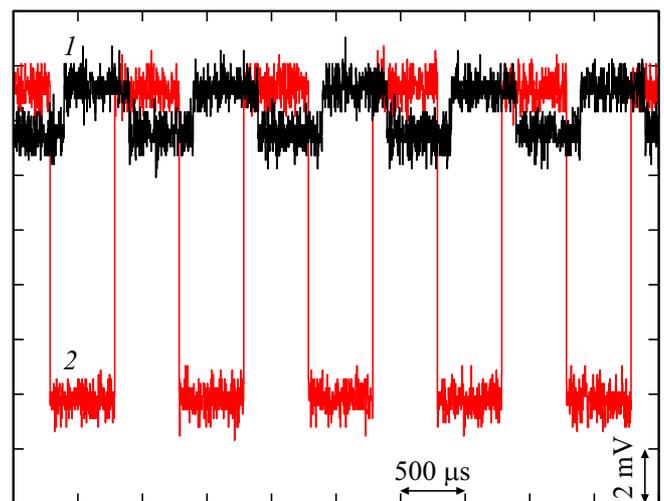


Рис. 2. Осциллограммы СВЧ-сигнала, полученные на детекторном приемнике. 1 — лазер выключен; 2 — лазер засвечивает пластину из монокристалла германия; лазерная мощность, падающая на Ge, составляет $P_{las} = 2.64\ \text{W}$. Масштаб по вертикали: $2\ \text{mV/div}$; развертка по времени: $500\ \mu\text{s/div}$.

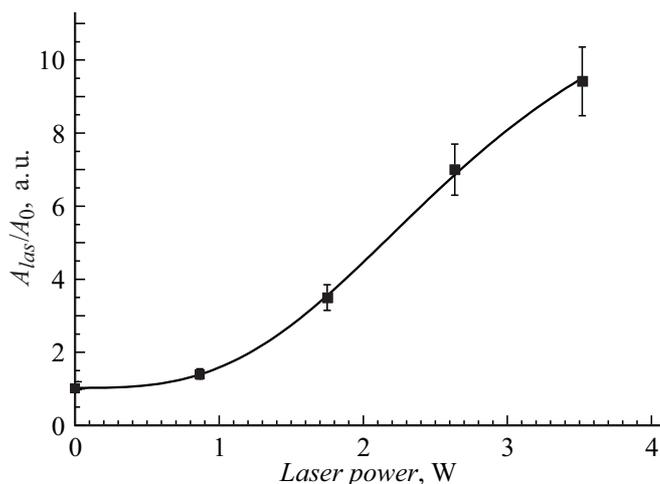


Рис. 3. Относительное увеличение амплитуды сигнала, регистрируемого детекторным приемником при облучении антенны из монокристаллического германия лазером с $\lambda = 975$ nm.

поглощенной в кристалле, а не от геометрии облучения. В случае использования Ge в качестве материала для плазменных антенн обнаружилось, что значительное влияние на генерацию свободных носителей оказывает длительность экспозиции. В экспериментах при облучении антенны сразу после открытия диафрагмы (рис. 1) наблюдалось резкое изменение амплитуды сигнала на детекторе, затем в течение нескольких секунд происходило дальнейшее увеличение амплитуды принимаемого сигнала, которое в зависимости от падающей на кристалл лазерной мощности могло достигать 20–30%. Для данного эксперимента с помощью численной модели [9,10] были проведены оценки концентрации свободных носителей, возникающих при облучении Ge лазерным излучением: $n_e \approx 10^{15} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Эти оценки хорошо согласуются с данными по прямому измерению проводимости облучаемых образцов кристалла Ge.

Таким образом, в работе предложен метод создания полупроводниковой плазменной антенны с помощью лазерного излучения. Метод обладает большими перспективами для создания управляемых антенн. Описана первая успешная реализация полупроводниковой плазменной дипольной антенны для передачи излучения СВЧ-диапазона. Экспериментально доказана возможность управления эффективностью передачи сигналов СВЧ-диапазона за счет регулирования интенсивности засветки полупроводниковой вибраторной антенны лазерным излучением.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию приемопередающих устройств терагерцевого (THz) диапазона ($\sim 3 \text{ mm} - 30 \mu\text{m}$; $3 - 300 \text{ cm}^{-1}$), пограничного между оптическим и радиодиапазоном [11]. В этом диапазоне более перспективными для использования в качестве плазменных антенн на

основе полупроводников, облучаемых лазером (или светом высокой интенсивности), могут быть отражательные антенные решетки [4,12], а также перспективно управление коэффициентом преломления и отражения падающего излучения в спектральной области $\lambda = 0.1 - 0.01 \text{ cm}$. Известно, что Ge и Si широко используются в устройствах, работающих в THz-области спектра [13], поэтому, формируя с помощью лазера плазму нужной концентрации в полупроводниковых структурах, можно создавать управляемые поглотители THz-диапазона [14]. Заметим, что такое управление электромагнитными характеристиками материала в спектральной области $\lambda = 0.1 - 0.01 \text{ cm}$ достигается более простым и естественным образом, чем предлагается в работах [15,16].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Kumar R., Bora D. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. N 5. P. 053303.
- [2] Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., Негбедов В.И. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 4. С. 365–368.
- [3] Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Рухадзе К.З. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 10. С. 1216–1220.
- [4] Минаев И.М., Сергейчев К.Ф. // Тр. ИОФАН. 2014. Т. 70. С. 186–213.
- [5] Ким А.В., Марков Г.А., Смирнов А.И., Умнов А.Л. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 5. С. 34–37.
- [6] Пахотин В.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 8. С. 22–29.
- [7] Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Тараканов В.П., Сергейчев К.Ф., Трефилов А.Ю. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 5. С. 423–435.
- [8] Bogachev N.N., Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Rukhadze A.A. // Plasma Phys. Rep. 2015. V. 41. N 10. P. 792–798.
- [9] Алексеев Е.Е., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Роголин В.Е., Фирсов К.Н. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. В. 6. С. 790–794.
- [10] Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 328 с.
- [11] Гарнов С.В., Щербаков И.А. // УФН. 2011. Т. 181. № 1. С. 97–102.
- [12] Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе К.З., Тараканов В.П., Тихоневич О.В. // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 5. С. 590–596.
- [13] Каплунов И.А., Колесников А.И., Кропотов Г.И., Роголин В.Е. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. В. 3. С. 271–274.

- [14] *Лерер А.М., Макеева Г.С.* // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 18. С. 103–110.
- [15] *Мунина И.В., Тургалиев В.М., Вендик И.Б.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 12. С. 59–65.
- [16] *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 1. С. 3–28.