

«Velocity overshoot» и ТГц-генерация в гетероструктурном $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ p-i-n диоде

В. Н. Трухин^{1*}, В. Л. Малевич^{2,3}, В. С. Калиновский¹, И. А. Мустафин¹, Х. Fan⁴, Е. В. Контрош¹,
К. К. Прудченко¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 603087, Санкт-Петербург, Россия

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

³Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁴Научно-исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*valera.truchin@mail.ioffe.ru

В настоящей работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования (аналитическая модель и моделирование методом Монте-Карло) процесса генерации терагерцового излучения гетероструктурными $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ p-i-n диодами при возбуждении фемтосекундными оптическими импульсами. Процесс терагерцовой генерации изучался методами терагерцовой спектроскопии с временным разрешением.

В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что временное положение ТГц-импульса зависит от величины обратного смещения на p-i-n диоде [1]. При увеличении обратного смещения происходит рост задержки ТГц-импульса, затем при некотором значении обратного смещения задержка ТГц-импульса уменьшается. Величина обратного смещения, при котором наблюдается экстремум задержки, зависит от длины волны возбуждающего излучения. Временная динамика формирования субпикосекундного импульса тока неравновесных носителей в p-i-n диоде рассчитывалась с использованием многочастичного метода Монте-Карло, учитывающего экранирование электрического поля в i-слое из-за пространственного разделения электронов и дырок. Проведенное методом Монте-Карло моделирование процесса ТГц-генерации подтвердило экспериментальные результаты, и последующий анализ механизмов формирования фототока (соответственно, генерации ТГц-излучения) позволил объяснить немонотонное поведение положения максимума амплитуды ТГц-импульса от обратного смещения как результат смены механизма ТГц-генерации. При положительном смещении (внутреннее электрическое поле мало) на p-i-n диоде механизм ТГц-генерации обусловлен отражением фотоэлектронов от границы раздела p⁺-слоя и i-слоя. При обратном смещении и электрических полях <10 кВ/см механизм ТГц-генерации меняется и определяется эффектом экранирования внутреннего электрического поля в результате пространственного разделения фотовозбужденных электронов и дырок. При таком электрическом поле фотоэлектрон за время импульсной релаксации не успевает набрать энергию для перехода в L-долину с большей эффективной массой. Эффект экранирования приводит к спаду фототока. Скорость фотоэлектрона будет максимальной в момент времени, когда существенно начнет изменяться электрическое поле вследствие эффекта экранирования фотовозбужденными носителями тока. Этот временной момент зависит от величины электрического поля. Результаты моделирования методом Монте-Карло показывают, что повышение электрического поля приводит к увеличению временной задержки положения максимума фототока, соответственно и ТГц-импульса. Дальнейшее увеличение электрического поля до 22 кВ/см приводит к очередной смене механизма ТГц-генерации ввиду проявления эффекта «velocity overshoot» вблизи границы раздела i-слоя и p⁺-слоя, где начальное электрическое поле меньше экранируется. Формирование импульса фототока в данном случае обусловлено ускорением электронов в электрическом поле до скорости, значительно превышающей скорость насыщения на временах сотен фемтосекунд, и последующего резкого спада, связанного с междолинным переходом электронов из Г-долины. Начало проявления эффекта «velocity overshoot» зависит от длины волны оптического излучения. При электрическом поле >22 кВ/см ТГц-генерация в p-i-n диоде происходит в результате эффекта «velocity overshoot» во всей области i-слоя. Повышение обратного смещения приводит к уменьшению временной задержки фототока, соответственно и ТГц-импульса.

Для описания динамики фотоэлектронов, возбуждаемых фемтосекундными оптическими импульсами в p-i-n диоде $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, была использована аналитическая модель на основе уравнений баланса импульса и энергии с зависимыми от энергии электрона параметрами τ_p , τ_e , m_e^* (уравнения решались численным методом с помощью вычислительной программы «Mathematica»). Волновая форма фототока (амплитуда, длительность, положение максимума) существенно зависит как от обратного смещения, так и от уровня возбуждения, а также кванта возбуждения. Моделирование на основе аналитической модели подтвердило экспериментальные результаты немонотонного поведения положения максимума амплитуды ТГц-импульса от обратного смещения, уровня возбуждения и частоты возбуждающего оптического излучения.

I. V. Trukhin, I. Mustafin, V. Malevich, X. Fan, V. Kalinovskii, E. Kontrosh, K. Prudchenko, THz generation by $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructured p-i-n diode // Appl. Phys. Lett. 125, 031101 (2024).