

УДК 535.215

ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

© 2019 г. К. Т. Ч. Ву¹, *, Г. М. Казарян¹, В. Л. Саввин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: kt.vu@physics.msu.ru

Изучение преобразования терагерцевого излучения в электрический ток является важной задачей для поиска новых способов полезного использования солнечной энергии и энергии теплового излучения, конструкции новых ИК-детекторов и других целей. Происходящие в ходе выпрямления терагерцевого сигнала процессы могут быть рассмотрены в рамках теории туннелирования, стимулированного фотонами.

DOI: 10.1134/S0367676519010265

Современные технологии позволяют изготавливать антенны, характерный размер которых сравним с длиной волны электромагнитного излучения в оптическом диапазоне [1]. Из этого возникает идея применения хорошо известных методов радиофизики к более высокочастотным диапазонам излучения. Например, использовать для преобразования инфракрасного и видимого излучения в электрический ток устройства, называемые ректеннами, вместо обычно применяемых полупроводниковых фотоэлементов.

Ректенна — это соединенный с антенной диодный выпрямитель, предназначенный для приема и преобразования электромагнитного излучения в электрический ток [2].

Актуальность применения ректенн для сбора оптического или инфракрасного излучения можно обосновать следующими положениями. Эффективность полупроводниковых элементов ограничена теоретически пределом Шокли–Квейснера [1]. Этот предел составляет примерно 33% для однопереходных фотоэлементов. Использование ректенн может позволить улучшить этот показатель [2]. Кроме того, в инфракрасном диапазоне получаемая при помощи полупроводниковых устройств мощность существенно меньше эквивалентной мощности шума в данном диапазоне. Преимуществом ректенн также является то, что их спектральные свойства определяются не материалами, а структурой. Это позволяет производить гораздо более тонкую настройку этих устройств, чем полупроводниковых фотоэлементов.

При работе на высоких частотах возникает проблема выбора или создания подходящего выпрямляющего элемента [3], поскольку обычно

применяемые в радиодиапазоне диоды с барьером Шоттки и $p-n$ -диоды не обладают достаточным быстродействием для работы в ИК- и оптическом диапазонах. Одним из перспективных вариантов является использование диодов типа МДМ (металл–диэлектрик–металл), которые отличаются от других наноструктур, используемых в качестве выпрямляющего элемента, относительной простотой изготовления.

МДМ-диод может считаться классическим выпрямителем только на относительно низких частотах, порядка нескольких терагерц. Когда напряжение, соответствующее энергии падающих фотонов, становится сравнимым или большим масштаба напряжения, на котором кривизна ВАХ диода значительна, выпрямление уже не может считаться классическим. Для изучения такого процесса можно воспользоваться полуклассическим подходом, основанным на теории туннелирования, стимулированного фотонами (photon-assisted tunneling, PAT) [3].

В рамках этой теории влияние переменного сигнала можно смоделировать как модуляцию уровня Ферми одной из сторон перехода, в то время как уровень другой остается постоянным (рис. 1) [4].

Будем считать, что напряжение на диоде равно

$$V_{diode} = V_D + V_\omega \cos(\omega t), \quad (1)$$

где V_D — напряжение постоянного смещения, а V_ω — напряжение переменного сигнала с частотой ω . Таким образом, влияние высокочастотного сигнала на гамильтониан контакта можно записать как

$$H = H_0 + eV_\omega \cos(\omega t), \quad (2)$$

где H_0 — невозмущенный гамильтониан контакта.

Влияние модуляции волновой функции на ток туннелирования проявляется в том, что все одно-электронные состояния оказываются промодулированы постоянным напряжением с шагом, равным напряжению, соответствующему энергии падающих фотонов $V_{ph} = \hbar\omega/e$. В силу этого световой постоянный ток можно получить в виде [2]:

$$I_{illum}(V_D, V_\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\alpha) I_{dark}(V_D + nV_{ph}), \quad (3)$$

где I_{dark} – темновая ВАХ, ток, проходящий через диод в отсутствие освещения, J_n – функция Бесселя порядка n , а $\alpha = eV_\omega/V_{ph}$. Нужно отметить, что данное рассмотрение относится к случаю освещения монохроматическим излучением. В данном контексте можно получить полуклассические выражения для сопротивления и чувствительности МДМ-диода.

Вместе с постоянным током, представленным в выражении выше, через диод протекает переменный ток, состоящий из гармоник частоты ω .

$$I_\omega = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\alpha) [J_{n+1}(\alpha) + J_{n-1}(\alpha)] \times I_{dark}(V_D + nV_{ph}). \quad (4)$$

Следствием этой теории является наличие трех режимов работы ректенны или похожей структуры. Тип этого режима зависит от параметра $\alpha = eV_\omega/\hbar\omega$ [2]. При значениях α много меньше единицы структура работает в квантовом режиме, характеризующемся тем, что электроны могут поглощать только отдельные фотоны. Это именно тот режим, для которого были получены выражения выше. В переходном режиме (при $\alpha \approx 1$) становятся существенными слагаемые высших порядков, а на световой вольт-амперной характеристике начинают появляться характерные ступеньки. Таким образом, для электронов становится доступным поглощение нескольких фотонов одновременно. В классическом пределе (α много больше единицы) результат теории туннелирования, стимулированного фотонами, для светового тока переходит в выражение [2]:

$$I_{illum} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{dark}(V_O + V_D \sin \theta) d\theta, \quad (5)$$

где V_O – напряжение на нагрузке, подключенной параллельно диоду. Нужно заметить, что в квантовом режиме работы такая структура ограничена пределом Тривича–Флинна, т.е. не может иметь КПД больше 44%.

В классическом режиме работы это не так, поскольку электронам доступно многофотонное поглощение. Использование классического режима работы может позволить существенно повысить

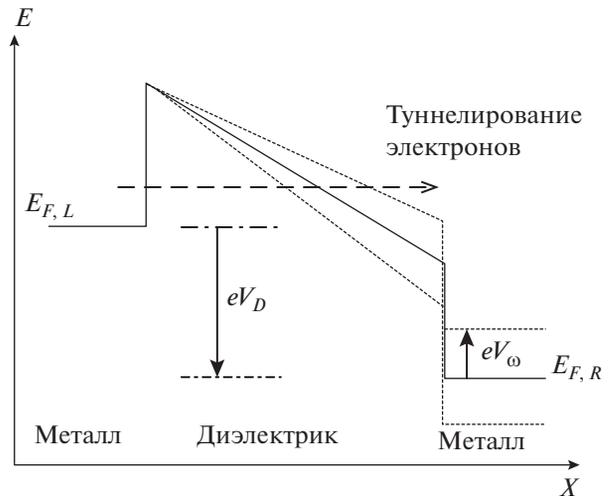


Рис. 1. Классическая модель учета влияния переменного сигнала на энергетическую структуру МДМ-диода. Ось E графика соответствует энергии частицы в структуре, ось x – координате. $E_{F,L}$ и $E_{F,R}$ – уровни энергии Ферми слева и справа от барьера соответственно, e – заряд электрона, V_D – напряжение на диоде, V_ω – напряжение переменного тока.

эффективность подобных структур, но его осуществление при работе на высоких частотах сопряжено с рядом трудностей. Например, требуемое для его достижения увеличение напряжения на диоде может привести к его пробоя. Поскольку МДМ-диоды очень тонкие, а напряжение пробоя оксидов имеет порядок $1 \text{ МВ} \cdot \text{см}^{-1}$, то для 10 нм диода это напряжение будет составлять всего около 1 В. Очевидно, что с этой проблемой еще только предстоит столкнуться в будущих исследованиях.

В изложенной теории темновая ВАХ предполагается известной. Существуют модели, которые позволяют обойти это требование при помощи введения модели перехода между электродами. Например, можно воспользоваться методом гамильтониана перехода [5] или, в более сложных случаях, численными методами [3]. В то же время антенны терагерцевых ректенн можно изучать при помощи моделей с классическими уравнениями Максвелла, делая, однако, поправку на то, что диэлектрическая проницаемость материалов в терагерцевом диапазоне существенно отличается от этого параметра в микроволновом диапазоне [4].

Используя упомянутые методы, можно оценить величину тока, которую можно получить от одной ректенны, и установить режим ее работы. При помощи модели ректенны или решетки ректенн [6] можно попытаться установить, какую величину составляет напряжение на клеммах антенны, в каком режиме она работает и как нужно изменить поле для ее оптимальной работы.

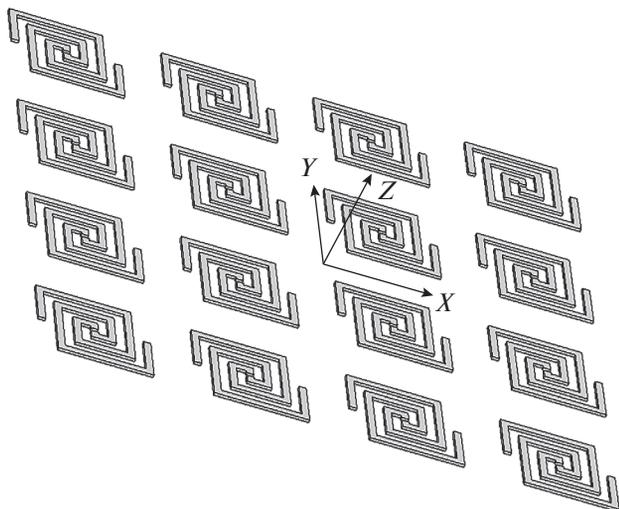


Рис. 2. Схема модели падения электромагнитной волны с координатными осями.

В модели предполагалось, что плоская электромагнитная волна падает нормально (параллельно оси Oz) на поверхность решетки антенн, состоящей из 16 элементов (рис. 2). Напряженность электрического поля была задана равной $1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, причем оно имело линейную поляризацию, ориентированную вдоль оси Ox . Частота соответствовала резонансной — 36.67 ТГц.

В результате получилось несколько зависимостей напряжения на выходе антенн от времени. Было выяснено, что установившееся значение составляет приблизительно $6.63 \cdot 10^{-7} \text{ В}$. Для тока получается значение $1.32 \cdot 10^{-8} \text{ А}$. Полученные величины позволяют оценить эффективность такой антенны. Падающий поток мощности можно выразить через напряженность электрического поля как [5]:

$$S = \frac{|E_m|^2}{2Z_0}, \quad (6)$$

где E_m — амплитуда падающей волны, Z_0 — волновое сопротивление пустого пространства, равное 377 Ом. Таким образом поток мощности получается приблизительно равным $1.33 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Принимая площадь антенны примерно равной площади квадрата со стороной 3.8 мкм (квадрат охватывает всю поверхность антенны и половину расстояния до каждого из 4 соседних элементов), получаем, что на одну антенну падает мощность $19.49 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$. Мощность на выходе антенны можно получить, умножив напряжение на силу тока, таким образом получая значение $8.75 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$. Деление мощности на выходе антенны на падающую мощность дает значение, примерно равное 45%.

Однако здесь стоит учесть, что при расчете площадь антенны была принята гораздо большей,

чем она есть на самом деле. Это было сделано для того, чтобы оценка оставалась справедливой для всей решетки в целом. Ожидается, что при уменьшении расстояния между антеннами в решетке до некоторого значения повысит эффективность.

Стоит отметить, что полученная от одной антенны мощность весьма мала. Если диод выпрямляющего элемента имеет ненулевое напряжение открытия, то к нему понадобится подключить последовательно достаточно много антенн. Такое подключение также составляет проблему для успешного преобразования электромагнитных волн терагерцевого диапазона в электрический ток при помощи ректенн.

Если предположить, что к каждой подобной антенне будет присоединен идеально согласованный МДМ-диод, а все напряжение на клеммах антенны полностью падает на диоде, то можно оценить параметр α , отвечающий за режим работы ректенны. В рассмотренной модели поток мощности падающей волны составлял $1.33 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$, что соответствовало напряжению $6.63 \cdot 10^{-7} \text{ В}$. Используя значения для заряда электрона и постоянной Планка, равные $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ и $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ соответственно, параметр α оказывается равен $4.37 \cdot 10^{-6}$, что соответствует квантовому режиму работы. Указанный поток мощности приблизительно равен потоку солнечной мощности, достигающему атмосферы Земли [7]. Поэтому, если считать, что вся эта мощность сосредоточена вблизи резонансной частоты антенны, для целей оценки, то порядок параметра α будет тот же.

Понимая сугубо приблизительный характер указанных предположений, можно утверждать, что получаемое напряжение в реальности окажется существенно меньше даже при соответствующей настройке резонансной частоты. Таким образом, для того чтобы достижение большей эффективности, связанной с переходом в классический режим работы, стало возможным, требуется значительно повысить получаемое напряжение, т.е. увеличить концентрацию электрического поля вблизи клемм антенны.

Согласно работе [1], длина когерентности излучения абсолютно черного тела может достигать десятков длин волн, что потенциально позволяет использовать для решетки из десятков антенн один диод, так как вклады от этих антенн будут конструктивно складываться. Но учитывая приведенную здесь оценку, можно прийти к выводу, что этого может оказаться недостаточно. В то же время соединение целой решетки антенн с одним диодом может облегчить согласование импедансов, поскольку обычно у МДМ-диодов, например, оно довольно велико [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было рассмотрено современное положение дел в области преобразования электромагнитных волн терагерцевого диапазона в электрический ток при помощи ректенн. Процессы, происходящие при преобразовании терагерцевого излучения в электрический ток, могут описываться в рамках теории туннелирования, стимулированного фотонами. Она применима, например, для описания МДМ-диодов, которые являются одним из перспективных вариантов выпрямляющего элемента для ректенн ИК- и оптического диапазонов.

Были представлены результаты моделирования взаимодействия решетки антенн с плоской электромагнитной волной. Таким образом, были получены значения токов и напряжений на выходе единичной антенны и ее эффективность, а также установлено, что в рамках модельных предположений оказывается, что ректенна работает в квантовом режиме. В практических конструкциях ректенны необходимо объединение группы ректенн для подключения к одному диоду.

Для повышения эффективности преобразования следует обратить особое внимание на способы увеличения напряженности электрического поля на клеммах антенны. Также возможно, что более глубокое понимание процессов, происходящих при преобразовании терагерцевого излучения в электрический ток, позволит преодолеть указанные трудности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lerner P.B., Cutler P.H., Miskovsky N.M.* // J. Nanophoton. 2015. V. 9(1). P. 093044.
2. *Joshi S., Moddel G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 265602.
3. *Piltan S., Sievenpiper D.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. P. 183101.
4. *Moddel G., Grover S.* Rectenna Solar Cells. New York: Springer, 2013. 390 p.
5. *Daivids P.S., Shank J.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. P. 075411.
6. *Бу К.Т.Ч. и др.* // Учен. зап. физ. фак-та МГУ. 2016. № 5. С. 165503.
7. *Kopp G., Lean J.L.* // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. 1115.