Вендин С.В., д-р техн. наук, проф.
Белгородская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Я. Горина
Щербинин И.А., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

К РАСЧЕТУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ СВЧ ОБРАБОТКЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

elapk@mail.ru

Рассмотрены вопросы расчета распространения электромагнитного импульса при СВЧ обработке диэлектрических сред. Дается общая постановка задачи, в которой на диэлектрический объект падает плоская электромагнитная волна в виде импульса.

В основу решения положены законы распространения электромагнитных волн в диэлектрических средах. Приводятся: общее решение определения мгновенного значения электромагнитного поля в глубине объекта, и частные решения для импульсов гауссовой, прямоугольной формы и высокочастотного прямоугольного импульса, а также соотношения для расчета СВЧ мощности рассеиваемой в полупроводящей среде при импульсной высокочастотной обработке.

Ключевые слова: *СВЧ, высокочастотный импульс, диэлектрический объект, электромагнитная волна, напряженность электромагнитного поля, электрическое поле, СВЧ мощность.*

В последнее время при разработке СВЧ технологий все более широкое внимание уделяется использованию импульсных СВЧ - источников. В связи с этим весьма актуальным является изучение вопросов распространения высокочастотных импульсов в полупроводящих средах, вопросов передачи СВЧ - мощности в определенную зону исследуемого объекта. В научной литературе известны отдельные работы, посвященные распространению электромагнитного импульса в полупроводящих средах [1] и, в частности, работы [2, 3, 4].

Ниже мы рассмотрим общее решение задачи распространения электромагнитного импульса для случая полупроводящих сред.

Пусть напряженность электрического поля падающей на объект плоской ЭМВ описывается выражением вида

$$\dot{E}_{y0} = \dot{E}_0 \exp(ik_0 z). \qquad (1)$$

Введем понятие комплексной передаточной функции [1], определяющей напряженность электрического поля на произвольной глубине $z = d$:

$$\dot{G}(d,\omega) = \dot{E}_y(d,\omega) / \dot{E}_0, \qquad (2)$$

где $\dot{E}_y(d,\omega)$ - комплекс напряженности электрического поля на произвольной глубине $z=d$; $\dot{E}_0$ - комплекс напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны на поверхности объекта.

Заметим, что величина $\dot{G}(d,\omega)$ связана с коэффициентом отражения ЭМВ на поверхности объекта $R(0,\omega)$ соотношением:

$$\dot{R}(0,\omega) = \dot{G}(0,\omega) - 1. \qquad (3)$$

В том случае, когда поле волны, нормально падающей на плоскую поверхность, представляет некоторый импульс вида

$$e_y(z,t) = e_y(0,0)\Phi(z,t). \qquad (4)$$

Спектр частот, содержащихся в импульсе, определяется преобразованием Фурье [1, 5]

$$\dot{E}^s_y(z,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e_y(z,t) e^{i\omega t} dt. \qquad (5)$$

Тогда поле волны, переданной в среду на глубине $z = d$, и на частоте ω имеет следующее выражение:

$$\dot{E}_y(d,\omega) = \dot{E}^s_y(0,\omega)\dot{G}(d,\omega). \qquad (6)$$

В таком случае мгновенное значение поля на глубине d обусловленное действием всего импульса, определяется интегралом обратного преобразования Фурье [1, 5]

$$e_y(d,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \dot{E}^s_y(0,\omega)\dot{G}(d,\omega) e^{-i\omega t} d\omega. \qquad (7)$$

Таким образом, соотношения (1)-(7) описывают реакцию среды на импульсное воздействие.

Рассмотрим важные частные случаи различной формы электромагнитного импульса.

I. Импульс имеет гауссову форму [1]

$$e_y(z,t) = e_y(0,0)\exp\left[-(t-\frac{z}{c})^2 / 2t_1^2\right]. \qquad (8)$$

$$E^s_y(z,w) = e_y(0,0)t_1(2\pi)^{\frac{1}{2}} \exp(-\omega^2 t_1^2/2)\exp(i\omega z/c). \qquad (9)$$

$$E^s_y(0,\omega) = e_y(0,0)t_1(2\pi)^{\frac{1}{2}} \exp(-\omega^2 t_1^2/2). \qquad (10)$$

$$e_y(d,t)=(2\pi)^{-1}\int_{-2,6t_1}^{2,6t_1}\dot{E}_y^s(0,\omega)\dot{G}(d,\omega)e^{-i\omega t}d\omega . \quad (11)$$

II. Импульс имеет прямоугольную форму длительностью τ_0.

$$\frac{e_y(z,t)}{e_y(0,0)}=\{1(t-z/c)0<\underset{t>\tau_0}{\overset{t<0}{t}}<\tau_0 . \quad (12)$$

$$\dot{E}_y^s(0,\omega)=e_y(0,0)\frac{2\sin(\tau_0\omega/2)}{\omega}e^{i\tau_0\omega/2} . \quad (13)$$

$$e_y(d,t)=(2\pi)^{-1}\int_{-\frac{2\pi}{\tau_0}}^{\frac{2\pi}{\tau_0}}\dot{E}_y^s(0,\omega)\dot{G}(d,\omega)e^{-i\omega t}d\omega . \quad (14)$$

III. Высокочастотный прямоугольный импульс длительностью τ_0

$$\frac{e_y(z,t)}{e_y(0,0)}=\{\sin(\omega_0 t-z/c)0<\underset{t>\tau_0}{\overset{t<0}{t}}<\tau_0 . \quad (15)$$

$$\dot{E}_y^s(0,\omega)=e_y(0,0)[\frac{1}{\omega_0-\omega}\sin[\frac{\omega_0-\omega}{2}\tau_0]\times$$

$$\times\exp[-i(\frac{\omega-\omega_0}{2}\tau_0+\frac{\pi}{2})]-\frac{1}{\omega_0+\omega}\sin[\frac{\omega_0+\omega}{2}\tau_0]\times \quad (16)$$

$$\times\exp[-i(\frac{\omega+\omega_0}{2}\tau_0+\frac{\pi}{2})].$$

$$e_y(d,t)=(2\pi)^{-1}\int_{\omega_0-\frac{2\pi}{\tau_0}}^{\omega_0+\frac{2\pi}{\tau_0}}\dot{E}_y^s(0,\omega)\dot{G}(d,\omega)e^{-i\omega t}d\omega . \quad (17)$$

Заметим, что в том случае, когда падающее поле на границе раздела сред имеет вид:

$$e_y(0,t)=U_y(t)\sin\omega t . \quad (18)$$

Реакцию среды на глубине $z=d$ можно оценить по огибающей ЭМП. Тогда, согласно [6] поле и огибающая ЭМП на глубине $z=d$ определяются выражениями:

$$e_y(d,t)=U_y(d,t,\omega)\sin\omega t . \quad (19)$$

$$U_y(d,t,\omega)=h(0)U_y(t)+\int_0^t h'(\tau)e^{i\omega\tau}U_y(t-\tau)d\tau . \quad (20)$$

Если $U_y(t)$ имеет форму прямоугольного импульса

$$\frac{U_y(t)}{e_y(0,0)}=\{10<\underset{t>\tau_0}{\overset{t<0}{t}}\le\tau_0 , \quad (21)$$

то в соответствии с (12)-(14), получим:

$$U_y(d,t,\omega)=e_y(0,0)\left[h(0)+\int_0^t h'(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau\right],$$

при

$$t\le\tau_0 \quad (22)$$

$$U_y(d,t,\omega)=e_y(0,0)\int_{t-\tau_0}^{t}h'(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau ,$$

при

$$t>\tau_0 \quad (23)$$

где

$$h(0)=\lim_{w\to\infty}\dot{G}(d,\omega)=\mathrm{Re}(h(0))+i\,\mathrm{Im}(h(0)) , \quad (24)$$

$$h'(\tau)=(2\pi)^{-1}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\dot{G}(d,\omega)-h(0)\right]e^{i\omega\tau}d\omega . \quad (25)$$

Функцию $h'(\tau)$ можно определить также по вещественной частотной характеристике $\left[\dot{G}(d,\omega)-h(0)\right]$, методом h функций, известным из теории автоматического управления [7].

Отметим следующее: приведенные соотношения для распространения электромагнитного импульса в полупроводящей среде позволяют определить изменение амплитуда и формы импульса на глубине $z=d$ в зависимости от частоты ЭМВ - ω и длительности импульса τ_0.

В то же время, известно [8, 9] что СВЧ мощность, рассеиваемая в полупроводящей среде, определяется соотношением:

$$P=\omega\varepsilon_0\varepsilon/E/^2\,tg\delta , \quad (26)$$

где ε_0 - диэлектрическая постоянная; $tg\delta$ - тангенс угла потерь; ε - диэлектрическая проницаемость среды; $/E/^2$ - квадрат модуля напряженности электрического поля.

И, если СВЧ мощность излучается в виде периодических импульсов длительностью τ_0 с периодом следования $T_ц$, то средняя СВЧ мощность, рассеиваемая в среде за период, определится по выражению:

$$P_{ср}=\frac{1}{T_ц}\int_0^{T_ц}P(t)dt \quad (27)$$

Тогда, с учетом (26), получим:

$$P_{ср}=\frac{1}{T_ц}\omega\varepsilon_0\varepsilon tg\delta\int_0^{T_ц}/E/^2\,dt . \quad (28)$$

В таком случае среднюю СВЧ - мощность за период на глубине $z=d$ с учетом соотношений (19)-(20) можно определить следующим образом:

$$P_{ср}=\frac{1}{T_ц}\omega\varepsilon_0\varepsilon tg\delta\int_0^{T_ц}U_y^2(d,t,\omega)dt . \quad (29)$$

Импульсная СВЧ мощность на глубине $z=d$ определится в соответствии с выражением:

$$P_и(d) = P_{ср}(d)\frac{T_ц}{\tau_0}. \qquad (30)$$

Таким образом нами получено общее решение задачи распространения высокочастотного электромагнитного импульса при СВЧ обработке диэлектрических сред.

Мгновенные значения напряженности электрического поля для высокочастотного прямоугольного импульса в глубине объекта определяются выражениями (19) и (25).

Для расчета СВЧ мощности, рассеиваемой в полупроводящей среде можно использовать соотношения (26)-(30).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах.М.: Мир, 1984. Кн.1,2.
2. Бабенко А.А., Вендин С.В. Расчет импульсных электромагнитных полей при СВЧ облучении диэлектрических материалов, ограниченных металлическим экраном// Моделирование и автоматизация технологических процессов с.-х. производства: Сб.науч.тр. МИИСП. М., 1991. С. 14-18.
3. Бабенко А.А., Вендин С.В. Энергетический спектр излучения при импульсном СВЧ-воздействии на семена с.х. растений/ Науч. техн.конф. ВНИПТИМЭСХ по итогам исследований 1990. Зерноград, 1991.С. 97-101.
4. Бабенко А.А., Вендин С.В. Распространение электромагнитного импульса при СВЧ-обработке семян// Сб. науч. тр. МИИСП, 1992.
5. Виноградов А.А., Зябкина О.Н. Показатели качества электрической энергии, обусловленые применением светодиодных светильников / Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 159-161.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. Учебник для вузов.- 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1978. 231 с.
7. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, Ленигр. отделение, 1984.-208 с.
8. Глуханов Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева. -Л.: Машиностроение, 1989. 56 с.
9. Виноградов А.А. Нестеров А.М., Нестеров М.Н. Энергостабильность региона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 4. С. 124-126.