

АНТЕНИ ТА МІКРОХВИЛЬОВА ТЕХНІКА

УДК 004.94

І. Ю. Тепляков

Національний університет “Львівська політехніка”

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАЗМОВИХ РЕБРИСТО-СТЕРЖНЕВИХ АНТЕН ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

© Тепляков І. Ю., 2020

Досліджено вплив параметрів плазми на просторовий розподіл поля плазмових антен. Розроблено числову модель плазмової ребристо-стержневої антени завдовжки 4λ з поперечним розподілом поля за значень $d_1/\lambda = 0,62$ та $d_1/\lambda = 0,63$. Адекватність числової моделі плазмової ребристо-стержневої антени перевірено експериментально. Наведено діаграми спрямованості плазмової ребристо-стержневої антени, отримані в результаті числового та експериментального моделювання.

Ключові слова: плазма; ребристо-стержнева антена; діаграма спрямованості.

I. Yu. Teplyakov

Lviv Polytechnic National University

MODELING OF THE PLASMA CORRUGATED-ROD ANTENNA

© Teplyakov I. Yu., 2020

This paper regards modern state of plasma antennas and the main modeling methods of electrodynamic parameters of radiative means based on plasma discharge. The author gives several references on the works which have been dedicated comparison analysis of metal and plasma antennas, where it is shown the main advantages and disadvantages of such antennas, basic usage ways and software tools for automatic calculation of electrodynamic parameters of plasma antennas such as radiation patterns and return losses. As a result of the done theoretical research the author have proposed to use surface wave antennas for creation of principally new plasma antenna construction. As a prototype of surface wave antenna it has been taken traditional metal corrugated-rod antenna. To achieve this goal it is necessary to change the central metal rod by plasma discharge. HFSS technology has been used for numerical modeling of the investigated plasma antenna. The main constructive parameters of plasma corrugated-rod antenna are width and period of radial inhomogeneities. As a result of numerical modeling, the plasma corrugated-rod antenna of relative length 4λ with a transverse field distribution at relative constructive parameters $d_1/\lambda = 0.62$ and $d_1/\lambda = 0.63$ has been developed. The plasma parameter influence on the spatial field distribution of the plasma antenna was investigated. The author has used Drude theory for development of new material that has electrical parameters like plasma. If plasma discharge is missing in the antenna structure the transverse field distribution will disappear, but the radiation level of side lobe will increase by 30° . The numerical model adequacy of the plasma corrugated-rod antenna was verified experimentally. Amplitude normalized radiation patterns of the plasma corrugated-rod antenna, obtained as a result of numerical and experimental modeling, are presented in the paper.

Key words: plasma; corrugated-rod antenna; radiation pattern.

Вступ

Останнім часом спостерігається істотне підвищення інтересу до завдань, пов'язаних із дослідженням просторового розподілу електромагнітного поля плазмових антен (ПА), методів їх аналізу та моделювання хвильових процесів, що збуджуються ПА [1–4]. На відміну від звичайних

металевих антен, в ПА замість металевих дротів або поверхонь використовується іонізований газ як провідне середовище для випромінювання та приймання сигналів [5–6]. Високоіонізована плазма є хорошим провідником, тому її можна використати як лінію передавання для поширення електромагнітних хвиль. Використання плазми замість твердого металу зумовлене істотними можливостями для різних застосувань у дослідницьких, інженерних та військових завданнях [1, 8–10]. В загальному випадку ПА складається зі скляної трубки, заповненої інертним газом або парами ртуті. В ПА використовують два типи сигналів: сигнал живлення, який іонізує газ у трубці, призводячи до утворення плазми, та НВЧ сигнал для передавання інформації [6].

Порівняльний аналіз металевих та плазмових антен, їхні переваги, недоліки та способи використання викладено в роботі [9]. Коли газ у ПА не є іонізованим, зменшуються розсіюване нею електромагнітне поле та наведені нею завади на інші близько розташовані антени [10]. Така антена стає електрично невидимою для радарів та інших засобів РЕБ. Вплив насиченості плазми на електродинамічні особливості ПА досліджено в роботі [2]. Отже, ПА можуть бути динамічно налаштовані та переконфігуровані, і виникає можливість замінити використання декількох звичайних антен. Покоління ПА здатне забезпечити велику швидкість передавання даних, а також, на відміну від звичайних металевих антен, для них характерний набагато менший тепловий шум [10]. Згідно із результатами теоретичних досліджень, виконаних у роботі [9], основні недоліки ПА спричинені високою вартістю та складністю виготовлення.

У роботах [2, 5, 7] наведено результати розрахунків діаграм спрямованості (ДС) ПА. Для числового моделювання ПА автори використовують програмний код КАРАТ (метод скінченних різниць у часовій області) [2], системи автоматизованого проєктування EMpro та Ansoft HFSS (метод скінченних елементів) [2, 5, 7]. У роботі [6] досліджено вплив довжини газорозрядної трубки на ефективність роботи ПА. Визначено оптимальну провідність плазми, яка залежить від відстані між електродами. Результати отримано за допомогою числового моделювання у CST Microwave Studio. За допомогою цього ж програмного продукту обчислено втрати потужності сигналу та наведено схему досліджуваного зразка на основі 12 люмінесцентних ламп, заповнених сумішшю парів ртуті та аргону [9]. Результати числового моделювання, викладені в роботах [2, 5–7, 9], підтверджено експериментально.

Відомі [11–13] антени поверхневих хвиль (АПХ), які призначені для передавання та приймання радіосигналів дециметрового та сантиметрового діапазонів хвиль. Конструкція таких антен складається із металевого стержня, модульованого діелектричного покриття та металевих неоднорідностей. Діелектричне покриття використовується як структура, що сповільнює поверхневу електромагнітну хвилю (ПЕХ). Сповільнювального ефекту в АПХ можна досягти, якщо замість діелектрика використати систему із металевих кілець [12]. АПХ, в яких діелектрик замінено металевими кільцями, називають ребристо-стержневими антенами (РСА). Враховуючи актуальність використання плазмового розряду в сучасних антенно-фідерних пристроях та традиційне використання АПХ та РСА як компонентів інфокомунікаційної техніки, у цій роботі ми розробили та дослідили плазмову РСА – РСА, в якій металевий стержень замінено плазмою.

Мета та завдання дослідження

У роботі поставлено завдання дослідити вплив конструктивних параметрів плазмової РСА на форму ДС, яке вирішується двома способами. Спершу наведено результати розроблення моделі плазмової РСА за допомогою Ansoft HFSS, потім – результати експериментальних досліджень плазмової РСА, які підтверджують адекватність числової моделі. З метою виявлення особливості ПА, за якої вона стає електрично невидимою, автор виконав дослідження у режимі роботи плазмової РСА та за відсутності плазми.

Об'єкт дослідження у роботі – плазмова РСА. Предмет дослідження – ДС, утворені збудженням плазмової РСА.

Числове моделювання плазмової РСА

У цьому розділі наведено результати числового моделювання плазмової РСА. Числове моделювання виконано за допомогою Ansoft HFSS, у якій створено 3D модель плазмової РСА завдовжки 4λ . Плазма в моделі задана як середовище, що описується за теорією Друде [1–2, 5, 14], згідно із якою діелектрична проникність плазми визначається за формулою:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i \times \nu_e)}, \quad (1)$$

де ω_p – плазмова частота, визначається за таким співвідношенням:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e \times e^2}{\varepsilon_0 \times m_e}}, \quad (2)$$

ω – циклічна частота радіосигналу; i – уявна одиниця. Провідність плазми σ обчислено за такою формулою [15]:

$$\sigma = \frac{n_e \times e^2}{m_e \times \nu_e}. \quad (3)$$

У таблиці наведено відомі [1, 5, 9] параметри плазми, за яких здійснено моделювання плазмової РСА.

Параметри плазми

Назва	Позначення	Величина
Концентрація плазми	n_e	$4 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$
Частота зіткнень електронів у плазмі	ν_e	10^8 Гц
Відносна магнітна проникність плазми	μ_r	1 Н/А^2
Діелектрична проникність вакууму	ε_0	$8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Маса електрона	m_e	$9 \times 10^{-31} \text{ кг}$
Заряд електрона	e	$1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$

На рис. 1 зображено структуру плазмової РСА, яка складається із таких елементів: 1 – скляна трубка, заповнена парами ртуті; 2 – металеві кільця; 3 – випромінювальні металеві радіальні неоднорідності. Основними конструктивними параметрами плазмової РСА є період металевих неоднорідностей d_1 та ширина металевих неоднорідностей Δ [13]. Оскільки такі параметри легко змінювати під час досліджень, у роботі досліджено вплив різних значень d_1/λ на форму ДС плазмової РСА. Параметри плазми, які наведені в табл. 1, залишалися незмінними упродовж дослідження. Діелектричну проникність та провідність плазми обчислено за формулами (1) та (3).

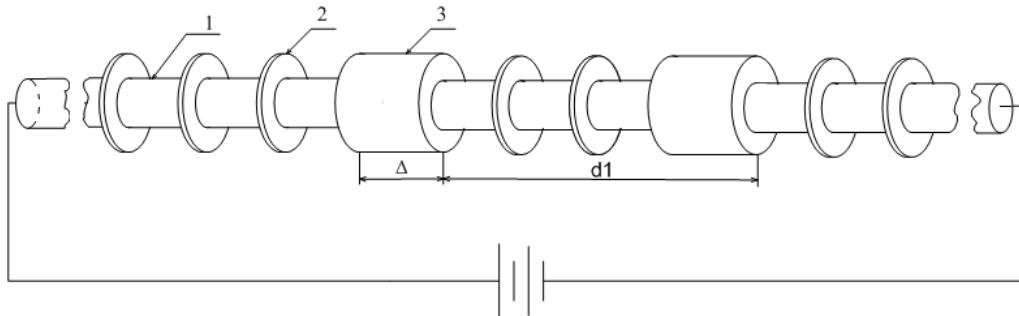


Рис. 1. Плазмова ребристо-стержнева антена

ДС плазмової РСА отримано за значень $d_1/\lambda=0,62$ та $d_1/\lambda=0,63$ у режимі роботи та за відсутності плазми. Результати числового моделювання наведено на рис. 2.

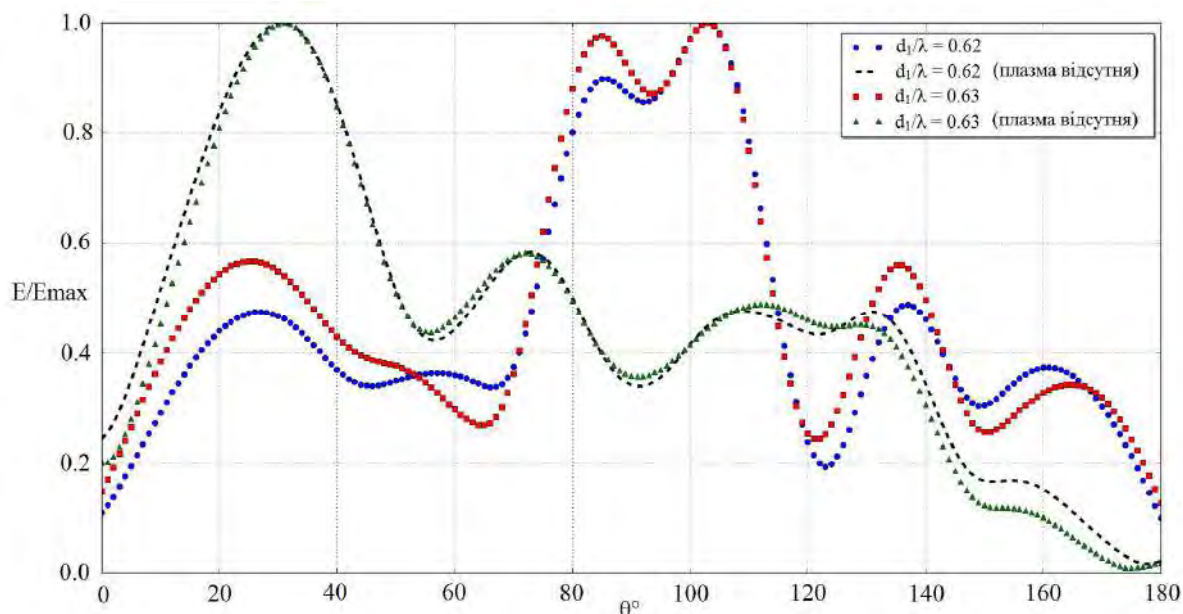


Рис. 2. Діаграма спрямованості плазмової РСА

Як видно на рис. 2, напрям основного випромінювання коливається від 75° до 112° на рівні 0,7. Рівні бічних пелюсток значно менші за рівень головного пелюстка. За відсутності плазми зникає поперечне випромінювання. У такому режимі спостерігається значне бічне випромінювання під кутом 30° . На рис. 2 видно, що форма ДС плазмової РСА залежить від співвідношення d_1/λ , а головний пелюсток роздвоюється. Такі особливості плазмової РСА можна використати під час виготовлення елементів інфокомунікаційної техніки, наприклад, інтерферометрів або комутаторів. Подібні ефекти описано в роботі [13], де отримано математичну модель металевої РСА. Порівняно з ДС, отриманими в згаданій роботі, головний пелюсток плазмової РСА ширший, а рівні бічних пелюсток вищі. Це зумовлено тим, що в роботі [13] математична модель описує металеві АПХ та РСА нескінченних розмірів. Під час поширення рухомої ПЕХ вздовж структури АПХ та РСА нескінченних розмірів енергія ПЕХ повністю випромінюється у вільний простір і не дифрагує на випромінювальних металевих радіальних неоднорідностях, якими є краї АПХ та РСА. В моделі, отриманій у цій роботі, враховано ефект відбиття рухомої ПЕХ від кінця структури та поширення у ній зворотної ПЕХ, а також забезпечено випромінювання однакової кількості енергії випромінювальними металевими радіальними неоднорідностями.

Результати експериментального моделювання

З метою підтвердження адекватності результатів, отриманих під час числового моделювання, автор здійснив експериментальне дослідження. Розроблено експериментальний макет плазмової РСА завдовжки 4λ , схему якого наведено на рис.1. Дослідження проведено в екранованій камері, стінки якої покрито радіопоглинальним матеріалом задля зменшення впливу зовнішніх завад та інтерференції, яка виникає через відбиття від стін електромагнітних хвиль. Плазмова РСА збуджувалася електромагнітним синусоїдальним сигналом із відомою λ . Від плазмової РСА наведене електромагнітне поле через коаксіальний кабель подавалося на АЦП. ДС отримано за значень $d_1/\lambda = 0,62$ та $d_1/\lambda = 0,63$ у режимі роботи плазмової РСА та за відсутності плазми.

На рис. 3 видно, що для плазмової РСА характерне поперечне випромінювання, яке зникає, як і у разі числового моделювання, за відсутності плазми. Ширина головних пелюсток змінюється від 85° до 95° на рівні 0,7. Під час експериментального дослідження ефект роздвоєння головних пелюсток не проявляється за заданих відношень d_1/λ . Рівень бокових пелюсток значно менший від головного

пелюстка. Ріст бокових пелюсток під кутом 30° , як і у разі числового моделювання, проявляється за відсутності плазми. Бічне випромінювання виникає через явище інтерференції двох ПЕХ: тієї, що рухається вздовж структури, та зворотної, відбитої від кінця структури, внаслідок перевипромінювання випромінювальними металевими радіальними неоднорідностями плазмової РСА.

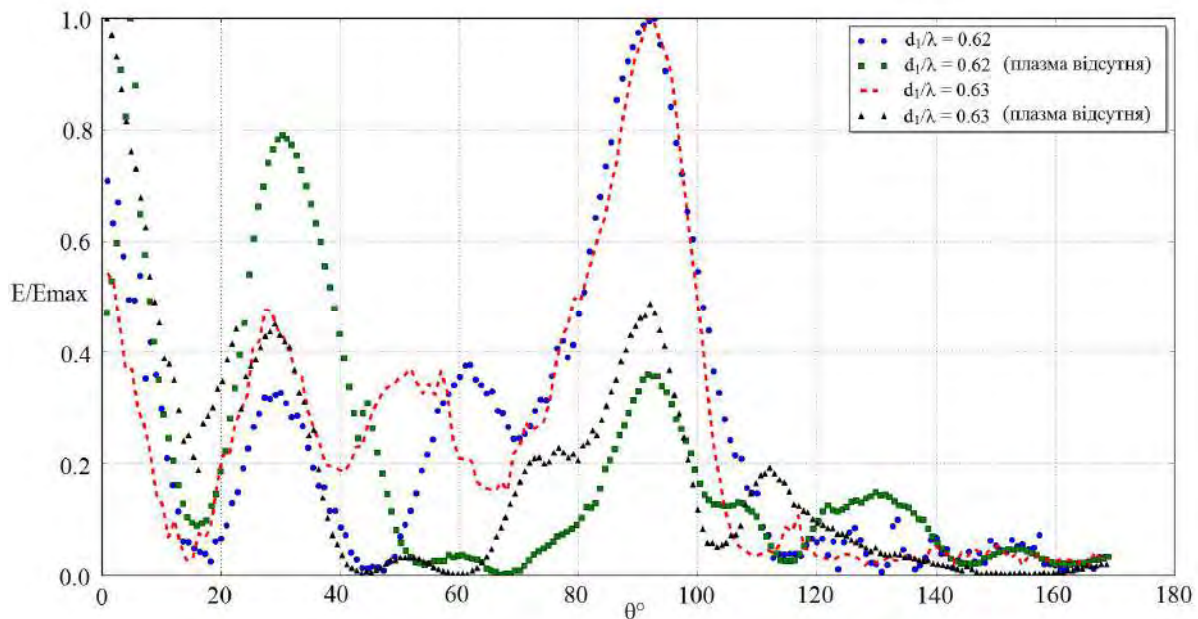


Рис. 3. Діаграма спрямованості плазмової РСА

Висновок

У роботі продемонстровано можливість використання плазмового розряду як одного із компонентів структури РСА. На основі огляду літературних джерел розроблено числову модель плазмової РСА завдовжки 4λ . Досліджено параметри плазми та вплив конструктивних параметрів на форму ДС плазмової РСА. Виявлено, що ДС розробленої плазмової РСА із конструктивними параметрами $d_1/\lambda=0,62$ та $d_1/\lambda=0,63$ має форму поперечного випромінювання до осі антени, яке зникає у разі відсутності плазми. Плазму в числовій моделі задано як середовище, що описується за теорією Друде. Адекватність результатів, отриманих за допомогою числового моделювання, підтверджено експериментальними дослідженнями.

Список використаних джерел

1. Jenn D. C. *Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art* / Naval Postgraduate School, Prepared for SPAWAR PMW 189, San Diego, 2003, 27 p.
2. Богачев Н. Н., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г. Моделирование режимов работы плазменной антенны. *Прикладная физика*, 2014, № 4.
3. Кириченко Ю. В., Карлов В. Д., Кійко А. С. Особливості використання плоского шару плазми з малим вигином в антенних системах. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил*, 2017, 4(53).
4. Сергейчев К. Ф., Минаев И. М. Плазменные антенны на поверхностных электромагнитных волнах. *Труды Института общей физики им. А. М. Прохорова*, 2014, Том 7.
5. Zong-sheng Chen, Li-fang Ma and Jia-chun Wang. Modeling of a Plasma Antenna with Inhomogeneous Distribution of Electron Density. *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2015, Article ID 736090, 5 p.
6. Vecchioni E., Cerri G., Russo P., Mariani Primiani V. *Experimental and Theoretical Investigation on Plasma Antennas*. Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche, 60131 Ancona.
7. Prince Kumar and Rajneesh Kumar. Simulation of Plasma Antenna Parameters. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*. May 2016, Vol. 4, Is. 5.

8. Syed Mohammad Adnan, PallaviAsthana, O. P. Singh, Mohd. Maroof Siddiqui. *Comparative Study of Plasma and Metallic Antenna*. ACEIT Conference Proceeding 2016, P. 229–232.
9. Raviprakash Shriwas and Sayali Gulhane. *Up gradation of Plasma Antenna by Using Fluorescent Tubes*. IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IIJEC), Vol. 3, Is. 1, January 2015.
10. Chintan Patel, Nadeem Masani, Tushar Parekh. *Plasma Antenna*. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 15, No. 6, Sep. 2014.
11. Драбкин А. Л., Зузенко В. Н., Кислов А. Г.. *Антенно-фидерные устройства*. Изд. 2-е. М.: Советское радио, 1974.
12. Thomas A. Milligan. *Modern antenna design*. 2nd ed.p. cm / TK7871.6.M54 2005
13. Hoblyk V. V. *Mathematical model antennas, based on modulated plazmon-polariton structures*. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukrain. BAHT, 2015, No. 4(98).
14. Podgornyi I. M. *Topics in Plasma Diagnostics*. Plenum Press, New York, 1971.
15. Kadomtsev B. B. and Pogutse O. P. *Electric conductivity of a plasma in a strong magnetic field*. Soviet physics jetp, Vol. 26, No. 6, june 1968.

References

1. D. C. Jenn *Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art* / D. C. Jenn; Naval Postgraduate School, Prepared for SPAWAR PMW 189. San Diego, 2003. 27 p.
2. N. N. Bogachev, I. L. Bogdankevich, N. G. Gusein-zade. *Modeling the operating modes of a plasma antenna*. Applied Physics, 2014, No. 4.
3. Yu. V. Куриченко, V. D. Karlov, A. C. Cue. *Features of using a flat layer of plasma with low bending in antenna systems*. Collection of scientific works of Kharkiv National University of the Air Force, 2017, 4 (53).
4. K. F. Sergeichev, I. M. Minaev. *Plasma antennas based on surface electromagnetic waves*. Proceedings of the Institute of General Physics A. M. Prokhorov, Vol. 7, 2014.
5. Zong-sheng Chen, Li-fang Ma and Jia-chun Wang. *Modeling of a Plasma Antenna with Inhomogeneous Distribution of Electron Density*. International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2015, Article ID 736090, 5 p.
6. E. Vecchioni, G. Cerri, P. Russo, V. Mariani Primiani. *Experimental and Theoretical Investigation on Plasma Antennas*. Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche, 60131 Ancona.
7. Prince Kumar and Rajneesh Kumar. *Simulation of Plasma Antenna Parameters*. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences. May 2016, Vol. 4, Is. 5.
8. Syed Mohammad Adnan, PallaviAsthana, O. P. Singh, Mohd. Maroof Siddiqui. *Comparative Study of Plasma and Metallic Antenna*. ACEIT Conference Proceeding 2016, pp. 229–232.
9. Raviprakash Shriwas and Sayali Gulhane. *Up gradation of Plasma Antenna by Using Fluorescent Tubes*. IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IIJEC), Vol. 3, Is. 1, January 2015.
10. Chintan Patel, Nadeem Masani, Tushar Parekh. *Plasma Antenna*. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Vol. 15, No. 6 – Sep 2014.
11. A. L. Drabkin, V. N. Zuzenko, A. G. Kislov. *Antenna feeder devices*. Ed. 2nd, Moscow: Soviet Radio, 1974.
12. Thomas A. Milligan. *Modern antenna design*. 2nd ed.p. cm / TK7871.6.M54 2005
13. V. V. Hoblyk. *Mathematical model antennas, based on modulated plazmon-polariton structures*. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, BAHT, 2015, No. 4(98).
14. I. M. Podgornyi, *Topics in Plasma Diagnostics*. Plenum Press, New York, 1971.
15. B. B. Kadomtsev and O. P. Pogutse. *Electric conductivity of a plasma in a strong magnetic field*. Soviet physics jetp, Vol. 26, No. 6, june, 1968.